

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Miro Tomašić**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

doc. dr. sc. Nenad Ferdelji

Student:

Miro Tomašić

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru doc.dr.sc. Nenadu Ferdeljiju, na ukazanom povjerenju, podršci, pomoći tijekom izrade rada i razumijevanju.

Miro Tomašić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Miro Tomašić

Mat. br.: 0035204852

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza rada malog kriogenog postrojenja za separaciju zraka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of small cryogenic air separation plant**

Opis zadatka:

Malo kriogeno postrojenje za separaciju zraka u dvjema destilacijskim kolonama (visokotlačnoj, odnosno niskotlačnoj), proizvodi industrijski kisik čistoće prvog razreda ( $\approx 99,7\%$ ) i dušik visoke čistoće ( $\approx 99,99\%$ ). Kompresor nazivno komprimira  $1400\text{ kg/h}$  zraka okolišnjeg stanja ( $p_{\text{uk}} = 1\text{ bar}$ ,  $\theta_{\text{uk}} = 25^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 50\%$ ) na visoki tlak  $200\text{ bar}$  s kojim ulazi u postrojenje koje radi prema Lindeovom principu separacije zraka s dodatnim prethlađenjem i turboekspanderom.

Postrojenje može raditi u različitim radnim režimima, proizvodeći:

- ukapljeni dušik;
- ukapljeni kisik;
- komprimirani plinoviti kisik;
- ukapljeni dušik i komprimirani plinoviti kisik;
- ukapljeni kisik i komprimirani plinoviti kisik.

U sklopu rada potrebno je:

- definirati i opisati glavne komponente postrojenja,
- izraditi tehnološku shemu postrojenja,
- analizirati rad postrojenja za različite radne režime i odrediti karakteristične veličine procesa separacije zraka,
- odrediti teorijski broj plitica visokotlačne i niskotlačne kolone.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

29. studenog 2018.

Rok predaje rada:

1. rok: 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obave:

1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zdao:

Doc. dr. sc. Nenad Ferdelji

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	8
1.1. Jednostavna kolona za separaciju zraka .....	9
1.2. Složena kolona za separaciju zraka .....	11
2. PROCES SEPARACIJE ZRAKA .....	15
2.1. Opis postrojenja.....	15
2.2. Bilanciranje postrojenja.....	17
2.2.1. Turbina T1 i T2 .....	17
2.2.2. Separator S1 .....	20
2.2.3. Separator S2 .....	22
2.2.4. Visokotlačna kolona.....	24
2.2.5. Kondenzator-isparivač .....	26
2.2.6. Niskotlačna kolona.....	27
2.2.7. Izmjenjivač topline.....	29
2.2.8. Rashladni uređaj.....	30
3. ANALIZA RADA SUSTAVA.....	31
3.1. Utjecaj parametara na izlazne količine proizvoda.....	31
3.2. Utjecaj odnosa protoka struja <i>I</i> <sub>8a</sub> i <i>I</i> <sub>8</sub> na refluks .....	35
3.3. Utjecaj temperatura u turbinama T1 i T2 i rashladnom uređaju .....	35
3.4. Utjecaj parametara i temperatura na procesne veličine sustava .....	37
3.5. Režimi rada .....	39
3.5.1. Ukapljeni dušik .....	39
3.5.2. Komprimirani plinoviti kisik.....	42
3.5.3. Komprimirani plinoviti kisik i ukapljeni dušik .....	42
3.5.4. Ukapljeni kisik .....	42
4. ODREĐIVANJE BROJA PLITICA .....	46
4.1. Složena destilacija .....	46
4.2. Potreban broj plitica u pojedinom režimu rada .....	48
4.2.1. Ukapljeni dušik (LIN) .....	48
4.2.1.1. Visokotlačna kolona.....	48
4.2.1.2. Niskotlačna kolona.....	52
4.2.2. Ukapljeni kisik (LOX) .....	57
4.2.2.1. Visokotlačna kolona.....	57
4.2.2.2. Niskotlačna kolona.....	60
5. ZAKLJUČAK.....	65
LITERATURA.....	66
PRILOG .....	67

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Jednostavna kolona za separaciju zraka [1] .....	9
Slika 2.	Jednostavna destilacija u Merkelovom dijagramu [1].....	10
Slika 3.	Složena kolona za separaciju zraka [1] .....	11
Slika 4.	Složena destilacija u Merkelovom dijagramu [1].....	13
Slika 5.	Turbine i kompresori .....	17
Slika 6.	Separator S1 .....	20
Slika 7.	Separator S2 .....	22
Slika 8.	Visokotlačna kolona .....	24
Slika 9.	Kondenzator-isparivač.....	26
Slika 10.	Niskotlačna kolona .....	27
Slika 11.	Izmjenjivač topline .....	29
Slika 12.	Rashladni uređaj .....	30
Slika 13.	Utjecaj omjera protoka <i>11b</i> i <i>11</i> .....	31
Slika 14.	Utjecaj omjera protoka <i>11b</i> i <i>11</i> .....	32
Slika 15.	Utjecaj omjera protoka <i>25b</i> i <i>25</i> .....	32
Slika 16.	Utjecaj omjera protoka <i>25b</i> i <i>25</i> .....	33
Slika 17.	Utjecaj omjera protoka <i>18a</i> i <i>18</i> .....	33
Slika 18.	Utjecaj omjera protoka <i>18a</i> i <i>18</i> .....	34
Slika 19.	Podjela visokotlačne kolone u 2 sekcije.....	48
Slika 20.	Odsječci pravaca na ordinati .....	50
Slika 21.	Postupak određivanja broja plitica .....	51
Slika 22.	Podjela niskotlačne kolone u sekcije.....	52
Slika 23.	Pravci radnih linija niskotlačne kolone .....	54
Slika 24.	Postupak određivanja broja plitica .....	56
Slika 25.	Pravci radnih linija .....	58
Slika 26.	Postupak određivanja broja plitica .....	59
Slika 27.	Pravci radnih linija .....	61
Slika 28.	Određivanje broja plitica .....	63

## POPIS TABLICA

Tablica 1.	Ulazni podaci za proračun kompresora .....	18
Tablica 2.	Ulazni podaci za proračun turbina.....	19
Tablica 3.	Podaci za struje separatora S1 .....	21
Tablica 4.	Podaci za struje separatora S2 .....	22
Tablica 5.	Podaci za struje visokotlačne kolone.....	25
Tablica 6.	Podaci za struje kondenzatora-isparivača.....	27
Tablica 7.	Podaci za struje niskotlačne kolone.....	28
Tablica 8.	Utjecaj odnosa protoka $I_{8a}$ i $I_8$ na refluks u kolonama .....	35
Tablica 9.	Utjecaj temperature na izlazu iz R.U.....	36
Tablica 10.	Utjecaj temperature $\vartheta_4$ na odvedeni toplinski tok.....	36
Tablica 11.	Utjecaj temperature na ulazu u turbinu T1 .....	36
Tablica 12.	Utjecaj temperature na ulazu u turbinu T2 .....	37
Tablica 13.	Utjecaj odnosa protoka $I_{Ib}$ i $I_I$ na snage kompresora.....	38
Tablica 14.	Utjecaj temperature na ulazu u turbinu T1 na snage kompresora .....	38
Tablica 15.	Utjecaj temperature na ulazu u turbinu T1 na specifični tehnički rad turbine T1 .....	38
Tablica 16.	Utjecaj temperature na ulazu u turbinu T2 na snage kompresora .....	39
Tablica 17.	Podaci za režim proizvodnje ukapljenog dušika .....	39
Tablica 18.	Snage kompresora u režimu ukapljenog dušika .....	41
Tablica 19.	Podaci za režim proizvodnje ukapljenog kisika .....	42
Tablica 20.	Snage kompresora u režimu ukapljenog kisika .....	44
Tablica 21.	Usporedba pojedinih režima.....	45
Tablica 22.	Podaci za destilat i struju napajanja .....	49
Tablica 23.	Podaci za zasićeno stanje struje $I_{8a}$ .....	49
Tablica 24.	Podaci za izračun minimalnog refluksa.....	53
Tablica 25.	Podaci za izračun toplinskih stanja .....	53
Tablica 26.	Podaci za destilat i struju napajanja .....	57
Tablica 27.	Podaci za stanje zasićenja struje $I_{8a}$ .....	57
Tablica 28.	Podaci za izračun minimalnog refluksa.....	60
Tablica 29.	Podaci za izračun toplinskih stanja .....	60
Tablica 30.	Usporedba broja plitica za različite režime rada .....	63

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

1-0-2019 Shema postrojenja za separaciju zraka



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>Latinične oznake</i>		
$h$	kJ/kg	entalpija
$M$	kg/kmol	molarna masa
$p$	bar	tlak, općenito
$q$	-	toplinsko stanje napajanja
$q_n$	kmol/s	količinski protok, općenito
$q_m$	kg/s	maseni protok
$P$	W	snaga, općenito
$R$	-	omjer refluksa
$T$	K	termodinamička temperatura
$w_{\text{teh}}$	kJ/kg	specifični tehnički rad
<i>Grčke oznake</i>		
$\eta$	-	korisnost, općenito
$\eta_{\text{is}}$	-	izentropski stupanj djelovanja
$\vartheta$	°C	temperatura
$\Phi$	W	toplinski tok
$\Psi$	kmol/kmol	molni udio komponente u smjesi
$\Psi_{\text{df}}$	kmol/kmol	molni udio lakše komponente u pari koja je u ravnoteži s kapljevnom
$\Psi_{\text{fd}}$	kmol/kmol	molni udio lakše komponente u kapljevinu koja je u ravnoteži s parom
$\varepsilon_o$	-	faktor hlađenja

## SAŽETAK

U ovom radu obrađuje se kriogena separacija zraka. Na početku je objašnjena jednostavna kolona za separaciju zraka, a potom složena kolona za separaciju zraka. Potom je opisan postupak separacije zraka na kisik i dušik. Prikazane su sve komponente sustava te njihove masene i energetske bilance. Pomoću bilanci analiziran je utjecaj pojedinih odnosa protoka na izlazne proizvode. Postrojenje može raditi u više režima rada proizvodeći: ukapljeni dušik, ukapljeni kisik, komprimirani plinoviti kisik, ukapljeni dušik i komprimirani kisik. Kombinacijom tih odnosa protoka odabrane su radne točke za svaki režim rada. Nakon kraju prikazan je McCabe-Thieleov postupak za određivanje teorijskog broj plitica u složenim destilacijskim kolonama.

Ključne riječi: destilacija, rektifikacijska kolona, plitice, separacija zraka

**SUMMARY**

This thesis deals with cryogenic air separation. At the beginning the working principle of simple and complex columns for cryogenic air separation are being explained. After that a description of air separation plant and all components with their material and energy balances is given. After that an analysis of chosen process parameters and their influence on production output was performed. The plant can operate in several regimes. It can produce: liquefied nitrogen, liquefied oxygen, compressed oxygen, liquefied nitrogen and compressed oxygen. Based on the heat and mass balances condition of all streams were determines for each working regime. Finally, a determination of number of theoretical stages in columns with adapted McCabe-Thiele procedure for complex distillation is given for two different working regimes.

Key words: distillation, rectification column, trays, air separation

# 1. UVOD

Komponente zraka kisik ( $O_2$ ) i dušik ( $N_2$ ) važne su za mnoge suvremene industrijske procese. Proizvodnja metala, kemijska industrija, procesi uplinjavanja, proizvodnja stakla i betona, zavarivanje i drugi procesi ovise o kisiku iz zraka, dok kemijska, naftna i elektronička industrija upotrebljavaju dušik iz zraka zbog njegove inertnosti. Osim toga, dušik se u kapljevitom stanju upotrebljava za kriogeno mljevenje, sušenje zamrzavanjem, kriogeno skladištenje bioloških materijala, zamrzavanje hrane i slične primjene. Argon (Ar) se upotrebljava kao inert kod zavarivanja, proizvodnje čelika, toplinske obrade i u proizvodnji elektronike. Kod malih kriogenih postrojenja ne proizvodi se čisti argon nego samo kisik i dušik visoke čistoće.

Po stupci razdvajanja zraka za industrijsku primjenu dijele se u dvije osnovne skupine: kriogena separacija zraka i nekriogeni procesi. Proces kriogene separacije primjenjuju se kada je potrebna visoka čistoća i velike količine proizvoda. Nekriogeni postupci provode se primjenom selektivne adsorpcije i membranskim postupkom na temelju razlika u propusnosti kroz membranu. Oni se za razliku od kriogenih procesa provode na temperaturama bliskim temperaturama okoline i najčešće se provode kada se ne zahtijevaju visoke čistoće plinovitih i kapljevutih proizvoda te kada su potrebne količine proizvoda relativno male.

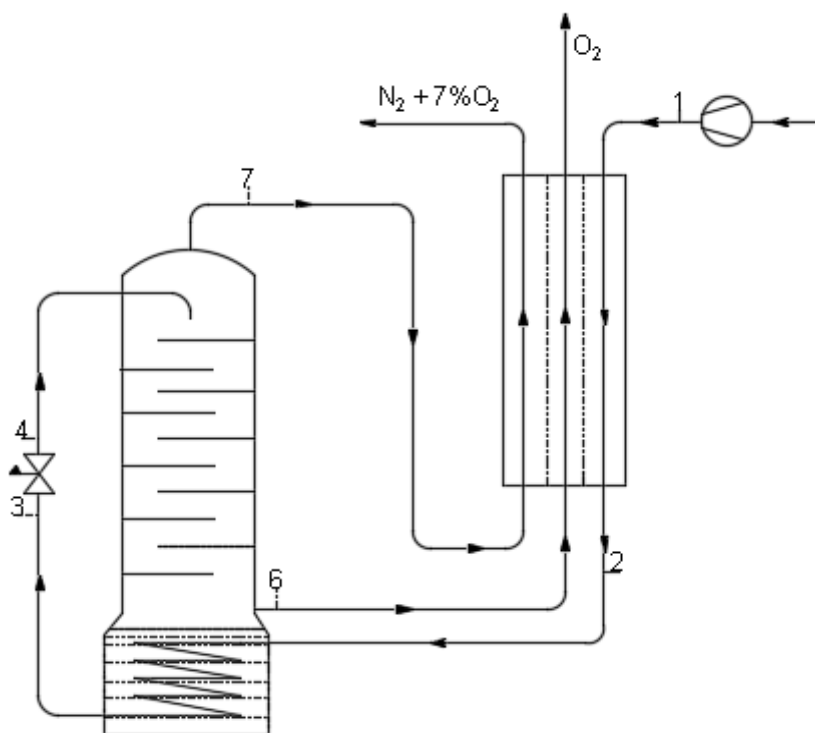
Kriogeno razdvajanje zraka danas je najdjelotvornija i najekonomičnija tehnologija za proizvodnju velikih količina  $O_2$ ,  $N_2$  i Ar kao plinovitih ili kapljevutih proizvoda. Proces se provodi u destilacijskim kolonama pri vrlo niskim temperaturama, a osnova razdvajanja je razlika u vrelištima. Jedinica za razdvajanje zraka (engl. *air separation unit*-ASU) koja primjenjuje konvencionalni proces višestruke kriogene destilacije može iz komprimiranog zraka proizvesti kisik ( $O_2$ ) visoke čistoće. Najčešće se radi o sustavu dviju kolona kod malih postrojenja, a kod velikih postrojenja sa susjednom jedinicom za izdvajanje argona.

Prvi postupak odvajanja zraka razvio je Carl von Linde. Proizvodnja je počela 1902. godine. To postrojenje izdvajalo je kisik iz zraka, a sustav s dvije kolone primjenjuje se od 1910. godine kako bi se omogućila istodobna proizvodnja kisika i dušika. Izdvajanje argona razvijeno je 1913. godine. Energija potrebna za postizanje vrlo niske temperature čini najveći dio troškova proizvodnje, pa su učinkovitost kompresije i izmjene topline vrlo važni. Jedinica za razdvajanje zraka (engl. *air separation unit*-ASU) zahtijeva veliku početnu investiciju, no

jedinica može ostvariti relativno visoke prinose i proizvoditi velike količine plinova ili kapljevina visoke čistoće.

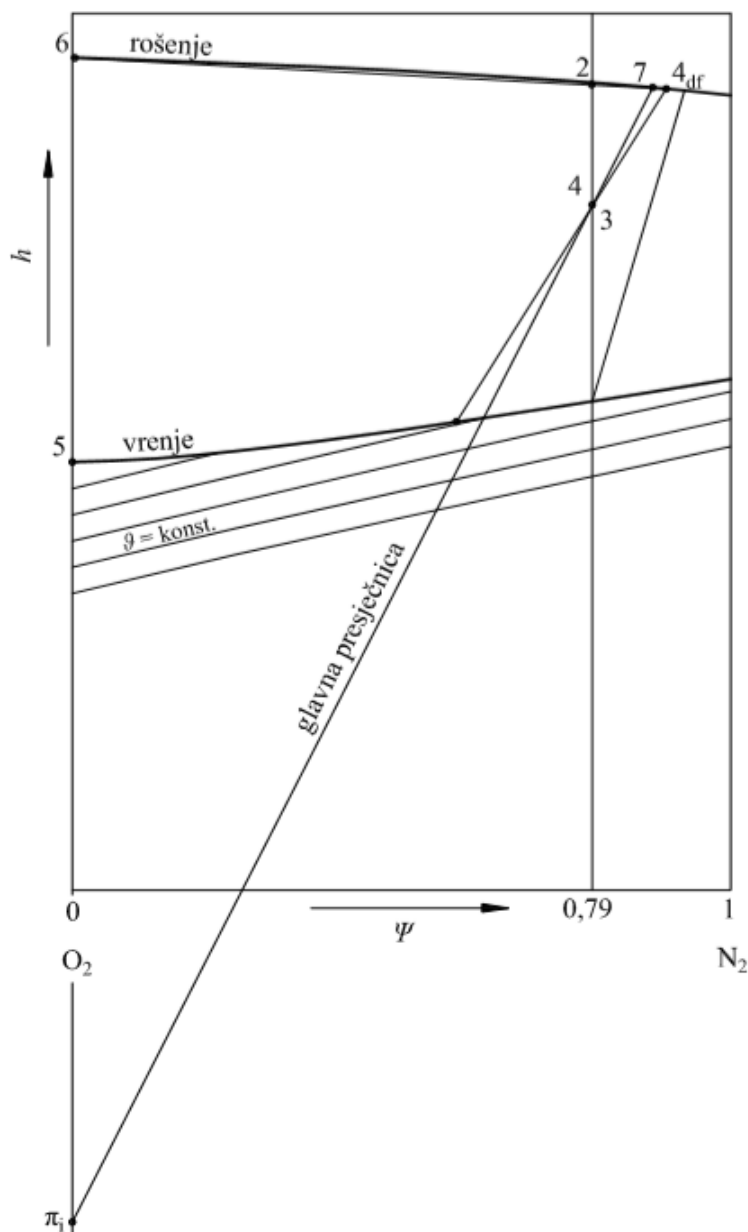
## 1.1. Jednostavna kolona za separaciju zraka

Na temelju literature [1] prikazana je jednostavna kolona za separaciju zraka. Ovaj postupak je prikladan za primjene gdje nije potrebno dobiti čisti dušik. Za grijanje kotlića služi još neukapljeni zrak 2 koji dolazi iz protusmjernog izmjenjivača topline. Prolaskom kroz grijalicu zrak se potpuno ukapljuje do stanja 3. Temperatura vrenja zraka pri istom tlaku je niža nego ona čistog kisika u kotliću koji treba grijati. Zato se tlak kondenzacije ogrjevnog zraka 2 mora odabrati dovoljno visokim da se zrak može ukapljiti pri temperaturi vrenja kisika. Za to je dovoljan tlak od 3 bar, ali se zbog potrebne razlike temperatura i realnog izmjenjivača topline taj tlak odabire u rasponu od 4 do 6 bar. Kompresor mora dobavljati zrak toga tlaka, pa ovdje nisu potrebni tako visoki tlakovi (200 bar) kao kod uređaja kojima je ukapljeni zrak konačni proizvod. Zrak stanja 3 koji se prolaskom kroz grijalicu kotlića ukapljuje, dovodi se prigušnom ventilu, gdje se prigušuje na stanje 4. Tako prigušeni zrak dovodi se kao komina 4 s gornje strane kolone za iscrpljivanje. Tok razdvajanja prikazan je na dijagramu 1. Za prikaz je korišten kvalitativni  $h - \Psi$  dijagram koji je općenito prikladan za prikaz postupaka destilacije. Na slici 1. prikazana je jednostavna kolona za separaciju zraka.



**Slika 1.** Jednostavna kolona za separaciju zraka [1]

Na slici 2. vidljivo je da se dušik koji se odvodi s vrha kolone ne može dobiti u čistom stanju već sadrži najmanje 1-  $\Psi_7$  kisika. Ovdje je  $\Psi_7 \leq \Psi_{4df}$  zbog toga što presječna kolone mora biti strmija od izoterme koju presijeca, a točke 3 i 4 se podudaraju zbog prigušivanja. Položaj točke 3 pri  $\Psi=0,79$  određen je izotermom kapljevine  $\vartheta_5$ . To je temperatura koju ima sadržaj u kotliću (čisti kisik) stanja 5, budući da točka 3 zbog prijelaza topline mora ležati iznad te izoterme. Razdvojeni dušik i kisik uvode se u izmjenjivač topline u kojem hlade svježi zrak prije ulaska u kolonu.



**Slika 2.** Jednostavna destilacija u Merkelovom dijagramu [1]



tamo kondenzira mogao imati potrebnu višu temperaturu od kisika  $11$  koji isparuje u kotliću gornje kolone. Dio kondenzata se vraća kao gotovo čisti dušik u donju kolonu, kojoj tako daje potrebni refluks. Drugi dio kondenzata se odvaja, te se sa stanjem  $6$  dovodi do ventila  $PV2$ . Taj dio dušika u prigušenom stanju  $7$  dovodi se kao refluks gornjoj koloni. Gornja kolona napaja se smjesom  $5$  koja se dobila prigušivanjem džibre  $4$  iz donjeg kotlića. I dušik i kisik se mogu proizvoditi u proizvoljnoj čistoći, a oduzimaju se kod niskog tlaka  $p$  iz gornje kolone. Opisana kolona se zapravo sastoji od dvije spojene kolone koje su fizički postavljene jedna na drugu.

Proces separacije prikazan je u dijagramu gdje se zbog preglednosti nije išlo na potpuno čiste produkte (kisik stanja  $8$  i dušik stanja  $9$ ). Točke  $8$  i  $9$  leže na liniji rošenja za tlak  $p$ . Postavi li se sveukupna bilanca tog uređaja, vidi se da entalpija dovedenog visokotlačnog zraka  $1$  mora biti sadržana u razdvojenom kisiku  $8$  i dušiku  $9$ . Zbog toga točka  $1$  leži na pravcu razmješavanja  $\overline{89}$ . I ovdje treba pažljivo kontrolirati stanje zraka  $1$  koji dolazi iz izmjenjivača topline, ali se i ovdje kolona podešava sama od sebe kao i uređaj za ukapljivanje. Osim toga na stanje  $1$  može se utjecati podešavanjem tlaka u izmjenjivaču topline.

Zrak stanja  $1$  ukapluje se u grijalici donjeg kotlića, i to kod visokog tlaka  $p_v$ . Stanje tog ukapljenog zraka prikazano je točkom  $2$  na liniji vrenja  $p_v$ . Prigušivanje u  $RV1$  na srednji tlak  $p_m$  daje stanje  $3$  komine za donju kolonu. Kroz tu točku treba položiti glavni pravac donje spojene kolone. Pripadni pol za jačanje  $\pi_m$  leži na tom glavnom pravcu na ordinati  $\Psi_6 \equiv \Psi_7$ , budući da je  $6$  proizvod koji se oduzima na vrhu kolone. Stanje  $7$  određeno je time što se mora nalaziti na istoj presječnici kao i stanje  $9$  gornje kolone, dakle u graničnom slučaju na izotermi zasićenja za točku  $9$  i tlak  $p$ . Zbog prigušivanja podudaraju se točke  $6$  i  $7$ . Točka  $6$  predoduje vrelu kapljevinu pri tlaku  $p_m$ , koja potječe iz deflegmatora donje kolone. Točka  $6$  i  $7$  leže u sjecištu izoterme zasićenja  $9$  za tlak  $p$  i linije vrenja za tlak  $p_m$ . U stvarnosti će točka  $7$  (i  $6$ ) ležati više nadesno, jer se prečnica točaka  $\overline{79}$  pri konačnom broju plitica ne smije podudarati s izotermom  $\vartheta_9$ , već mora biti strmija od nje.





za svaki kilomol džibre dovodi veća količina topline  $q_m$  nego se odvodi jednom kilomolu tlačnog zraka 1 (toplina  $q_2$ ). Kad toplinu  $q_2$  projiciramo iz pola  $\pi_m$  nalijevo dok zraka  $\overline{\pi m 1}$  ne siječe liniju vrenja  $p_m$  dobivamo točku 4 i ispod nje pol  $\pi_{im}$ . Sad se može odrediti potrebni broj plitica donje spojene kolone.

Toplina deflegmatora  $q_{Rm}$  koja se u donjoj koloni odvodi za 1 kmol proizvoda 6 služi ujedno kao ogrjevna toplina gornjeg kotlića. Ako se pak svede na 1 kmol polaznog zraka 1, dobiva se projekcijom dužina  $\overline{1 10}$ . Ta se dužina dobiva tako da se toplina  $q_{Rm}$  projicira iz stanja džibre 4 na ordinatu  $\Psi_1$ . Da se toplina preračuna u  $q_i$  za 1 kmol plinovite džibre 8 gornjeg kotlićam treba projicirati dužinu  $\overline{1 10}$  iz dušikovog stanja 9 na ordinatu  $\Psi_8$ . Time je odmah jednoznačno određen pol iscrpljivanja  $\pi_i$ . Glavni pravac gornje kolone mora prolaziti polom  $\pi_i$  i poznatim stanjem komine 5, koja se zbog prigušivanja podudara s točkom 4. Time je glavni pravac gornje kolone jednoznačno određen. Pol jačanja  $\pi$  leži u sjecištu nađenog glavnog pravca s prije odabranom presječnicom  $\overline{7 9}$ . Treba još samo provjeriti da li su taj glavni pravac i sve presječnice strmiji od presijecanih izoterma zasićenja. Ako jesu, može se odmah odrediti potreban broj plitica. U protivnom treba promijeniti položaj točke 6 ili tlakove  $p_v$  ili  $p_m$ , te konstrukciju ponoviti s novim pretpostavljenim veličinama. Pri izboru tlaka  $p_m$  i  $p_v$  treba nastojati da tlak  $p_v$  bude što niži, budući da pogonska snaga kompresora ovisi o tom tlaku. Pri tom se ne smije ići ispod neke gornje granice koja je dana u svojstvima smjese dušika i kisika. Kisik stanja 11 u gornjem kotliću, grije se deflegmatorom donje kolone, pa zato treba temperatura kondenzata 6 u deflegmatoru biti viša ili u krajnjem slučaju jednaka temperaturi vrenja  $\vartheta_{11}$ . Prema tome treba tlak  $p_m$  donje kolone odabrati barem tako visokim da točka 6 na liniji vrenja  $p_m$  leži nešto iznad izoterme kapljevine  $\vartheta_{11}$ . Tlak  $p_v$  mora biti tako visok da se smjesa 4 iz donjeg kotlića može grijati ukapljenim zrakom 2 pa mora biti  $\vartheta_2 \geq \vartheta_4$ . Osim toga, treba provjeriti zadovoljava li se odabranim tlakovima uvjet prema kojemu sve presječnice koje prolaze kroz četiri nađena pola leže strmije od izoterma zasićenja što ih presječnice sijeku. Položaj pola  $\pi$  u ovom slučaju slobodno pada izvan dijagrama. Njegov sastav je veći od 1 i označuje fiktivni sastav nestvarnog, računskog protoka koji je razlika dviju suprotnih struja 7 i 9 (struja 7 se dovodi, a struja 9 odvodi na vrhu kolone). Kod običnih kolona, na vrhu se uvijek odvodila smo jedna struja, tako da je računaska razlika struja uvijek odgovarala nekom realnom protoku (proizvodu) zbog čega je taj sastav morao biti fizikalan. Ovisno o omjeru protoka i sastava struja 7 i 9 ovisi položaj pola  $\pi$  koji može pasti unutar ili izvan dijagrama.

## 2. PROCES SEPARACIJE ZRAKA

U ovom radu opisano je postrojenje koje služi za separaciju zraka koji se radi pojednostavljenja sastoji od 79% masenog udjela dušika i 21% masenog udjela kisika. Postrojenje može raditi u različitim režimima rada tako da se dobije što veći protok željenog proizvoda. Režimi u kojima može raditi su: ukapljeni dušik, ukapljeni kisik, komprimirani plinoviti kisik, ukapljeni dušik i komprimirani plinoviti kisik te ukapljeni kisik i komprimirani plinoviti kisik. U postrojenje ulazi 1400 kg/h unaprijed pripremljenog zraka iz kojeg je prilikom prolaska kroz apsorbere izdvojena vlaga, ugljikovodici i CO<sub>2</sub>. U postrojenju visokotlačna kolona radi na tlaku od 6 bar, a niskotlačna kolona na tlaku od 1,5 bar. Tlakovi na koje kompresori komprimiraju zrak su fiksni za ovo postrojenje. Kompresor K1 komprimira zrak na tlak od 25 bar, kompresor K2 na tlak od 38 bar, a kompresor K3 na tlak od 60 bar. Tlakovi su odabrani tako da temperatura nakon kompresije ne bude previsoka. Kasnije će biti objašnjen utjecaj temperature na rad kompresora.

Uvedene pretpostavke:

- u zraku se nalaze samo dušik i kisik
- s dna visokotlačne kolone izlazi struja sa 65% masenog udjela dušika
- s vrha visokotlačne i niskotlačne kolone izlazi čisti dušik
- s dna niskotlačne kolone izlazi čisti kisik
- sustav je idealno izoliran

### 2.1. Opis postrojenja

U nastavku će biti opisane komponente i rad postrojenja koji je shematski prikazan u prilogu. Zrak stanja 1 miješa se sa zrakom stanja 12 koji se nalazi u recirkulaciji i takav se komprimira na tlak od 25 te se hladi na početnu temperaturu. Takav zrak stanja 3 dijeli se na struju 3<sub>b</sub> i 3<sub>a</sub>. Struja 3<sub>a</sub> prolazi kroz rashladni uređaj i izmjenjivač topline te ulazi u turbinu T1 koja služi za pogon kompresora K3. Nakon turbine T1 ulazi u izmjenjivač topline i miješa se sa strujom 11<sub>b</sub> koja služi za recirkulaciju. Uloga recirkulacije zraka je povećanje hlađenja ulaznih struja u izmjenjivaču te povećanje količine ukapljenih proizvoda. Struja 3<sub>b</sub> ulazi u kompresor K2 gdje se komprimira na tlak od 38 bar te se potom hladi na početnu temperaturu

Nakon kompresora K2 struja 8 prolazi kroz kompresor K3 gdje se komprimira na tlak od 60 bar. Tako pripremljena struja stanja 10 ulazi u izmjenjivač topline gdje se hladi i dijeli na struju 10<sub>a</sub> i 10<sub>b</sub>. Struja 10<sub>a</sub> prolazi kroz turbinu T2 u kojoj ekspandira na tlak visokotlačne kolone čime nastaje hladna struja 11. Turbina T2 služi za pokretanje kompresora K2. Zrak stanja 11 se nakon turbine T2 dijeli na struju 11<sub>a</sub>, koja se kasnije odvodi u visokotlačnu kolonu i 11<sub>b</sub>, koja se recirkulira kroz izmjenjivač predajući rashladni učin ostalim strujama. Miješanjem struja 11<sub>b</sub> i 6 nastaje prethodno spomenuta struja 12 koja se koristi u recirkulaciji.

Prigušivanjem zraka stanja 10<sub>b</sub> s tlaka od 60 bar na tlak od 6 bar te njegovim prolaskom kroz separator S1 nastaje suhozasićena para stanja 14 i vrela kapljevina stanja 15. Zrak stanja 11<sub>a</sub> miješa se sa strujom 14 i ulazi u visokotlačnu kolonu koja radi pri tlaku od 6 bar. Struja 15 miješa se sa strujom 17 na izlazu iz visokotlačne kolone te se razdvaja se na struju 18<sub>a</sub> koja opet ulazi u visokotlačnu kolonu i struju 18<sub>b</sub> koja se prigušuje na tlak od 1,5 bar i ulazi u niskotlačnu kolonu.

Dio plinovitog dušika stanja 25<sub>b</sub> odvaja se od struje 25, komprimira na tlak od 6 bar, prolaskom kroz izmjenjivač hladi i potom miješa sa suhozasićenom parom stanja 28 koja izlazi iz visokotlačne kolone. Za kondenzaciju dušika koristi se dio struje kisika 34 koji isparava i vraća se nazad u niskotlačnu kolonu sa stanjem 35, a drugi dio struje kisika izlazi sa stanjem 36. Jedan dio struje 36 se odvaja u izmjenjivač topline gdje se koristi za hlađenje ulaznih struja te se naknadno komprimira i izlazi kao gotov proizvod-plinoviti kisik pod tlakom, a drugi dio struje izlazi kao ukapljeni kisik. Pri kondenzaciji dušika stanja 29 kisik stanja 35 isparava i ulazi u niskotlačnu kolonu koja radi pri tlaku od 1,5 bar. Kondenzator dušika služi kao grijalica niskotlačne kolone.

Kondenzirana struja dušika 30 dijeli se na struju 31 koja ulazi u visokotlačnu kolonu i struju 20 koja se prigušuje na tlak od 1,5 bar i ulazi u mokro područje. U separatoru S2 se struja 20 razdvaja na suhozasićenu paru 22 i vrelu kapljevinu 23. Struja dušika 19 s vrha niskotlačne kolone miješa se sa suhozasićenom parom 22 te se tako nastala mješavina grije prolaskom kroz izmjenjivač te se dijeli na struju 25<sub>a</sub> i 25<sub>b</sub>.

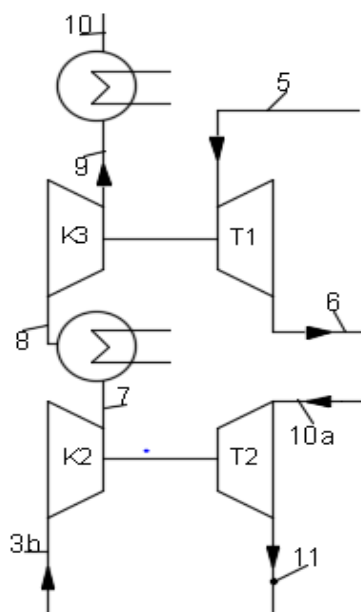
Jedan dio vrela kapljevine iz separatora S2 odlazi u niskotlačnu kolonu, a drugi dio izlazi kao proizvod-ukapljeni dušik stanja 23<sub>b</sub>. Pri vrhu niskotlačne kolone odvaja se para približno čistog dušika 32 koja prolaskom kroz izmjenjivač topline pospješuje hlađenje ulaznih struja i odlazi u apsorber gdje sudjeluje u odvajanju vlage, ugljikovodika i CO<sub>2</sub> iz zraka.

## 2.2. Bilanciranje postrojenja

### 2.2.1. Turbina T1 i T2

Prilikom ukapljivanja plinova može se koristiti prigušni efekt kako bi se plin doveo u mokro područje. U pogledu ekonomičnosti prigušivanje je izrazito nepovoljno te predstavlja trajan gubitak energije. Ohlađena struja koja se nakon prigušivanja nije ukapljila hladi svježju nadolazeću struju plina koja tek treba doći do prigušnog ventila. U namjeri da se smanji gubitak energije prilikom prigušivanja koriste se turbine koje također služe za spuštanje temperature i tlaka. Snaga koja se dobiva u turbini koristi se za pojedine stupnjeve kompresije plina.

Prikazano postrojenje ima dvije turbine T1 i T2. U prvoj turbini zrak ekspandira s tlaka od 25 bar na tlak od 6 bar, a u drugoj turbini zrak ekspandira s tlaka od 60 bar na tlak od 6 bar. Snaga za pogon kompresora K2 koji komprimira zrak s 25 bar na tlak od 38 bar dolazi preko zajedničkog vratila od turbine T2, a snaga za pogon kompresora K3 na isti način dolazi od turbine T1. Kompresor K3 komprimira zrak s 38 bar na tlak od 60 bar. Nakon svakog od stupnjeva kompresije koristi se rashladni uređaj koji služi za spuštanje temperature zraka na početnu temperaturu na usisu u kompresor. To se koristi iz razloga da nakon sljedećeg stupnja kompresije temperatura ne bude prevelika jer to nije dobro za ulje u kompresoru i kompresor koristi više snage. Turbine i kompresori prikazani su na slici 5.



**Slika 5.** Turbine i kompresori

Poznavajući temperature i tlakove mogu se odrediti specifični tehnički radovi kompresora K2 i K3. Uzet je izentropski stupanj djelovanja ( $\eta_{is}$ ) od 90% za kompresore i turbine. U tablici 1. prikazani su ulazni podaci za slučaj izentropske kompresije.

**Tablica 1.** Ulazni podaci za proračun kompresora

Kompresor	Točka	$p$ (bar)	$\vartheta$ (°C)	$h$ (kJ/kg)
K2	3 <sub>b</sub>	25	25	295,8
	7	38	56,8	327
K3	8	38	25	293
	9	60	67,5	335,1

Stvarna entalpija točke 7:

$$h_7 = \frac{h_{7s} - h_{3b}}{\eta} + h_{3b} = \frac{327 - 295,8}{0,9} + 295,8 = 330,5 \text{ kJ/kg} \quad (1)$$

Temperatura točke 7 određena je na temelju entalpije i tlaka iz programa Refprop i iznosi 63,4 °C. Temperature ostalih točaka su određene na isti način.

Stvarna entalpija točke 9:

$$h_9 = \frac{h_{9s} - h_8}{\eta} + h_8 = \frac{335,1 - 293}{0,9} + 293 = 339,8 \text{ kJ/kg} \quad (2)$$

Temperatura točke 9 iznosi 71,8 °C.

U tablici 2. prikazani su podaci na ulazu i izlazu iz tubina u slučaju izentropske ekspanzije:

**Tablica 2.** Ulazni podaci za proračun turbina

Turbina	Točka	$p$ (bar)	$\vartheta$ (°C)	$h$ (kJ/kg)
T1	5	25	-10	257,9
	6	6	-99	171,2
T2	10a	60	-100	130,5
	11	6	-173,2	67,3

Stvarna entalpija točke 6:

$$h_6 = h_5 - \eta (h_5 - h_{6s}) = 257,9 - 0,9 (257,9 - 171,2) = 179,9 \text{ kJ/kg} \quad (3)$$

Temperatura točke 6 iznosi -91 °C.

Stvarna entalpija točke 11:

$$h_{11} = h_{10a} - \eta (h_{10a} - h_{11s}) = 130,5 - 0,9 (130,5 - 67,3) = 73,6 \text{ kJ/kg} \quad (4)$$

Temperatura točke 11 iznosi -173,1 °C.

Uvodi se prvi parametar sustava promjenom kojega će se utjecati na iznose masenih protoka izlaznih proizvoda:

$$z = q_{m11b}/q_{m11} \quad (5)$$

Iz sheme postrojenja vide se jednakosti protoka:

$$q_{m2} = q_{m3} \quad (6)$$

$$q_{m3a} = q_{m4} = q_{m5} = q_{m6} \quad (7)$$

$$q_{m3b} = q_{m7} = q_{m8} = q_{m9} = q_{m10} \quad (8)$$

$$q_{m10a} = q_{m11} \quad (9)$$

Izjednačavanjem snage koju daje turbina T1 i snage potrebne za pogon kompresora K3 dobije se jednadžba:

$$P_{K3} = P_{T1} \quad (10)$$

$$q_{m3b} (h_9 - h_8) = q_{m3a} (h_5 - h_6) \quad (11)$$

Na isti način za turbinu T2 i kompresor K2 dobije se jednadžba:

$$P_{K2} = P_{T2} \quad (12)$$

$$q_{m3b}(h_7 - h_{3b}) = q_{m11}(h_{10a} - h_{11}) \quad (13)$$

Postavljanjem i rješavanjem sustava od 6 jednadžbi mogu se dobiti iznosi protoka:

$q_{m2}$ ,  $q_{m3b}$ ,  $q_{m3a}$ ,  $q_{m11}$ ,  $q_{m11b}$ ,  $q_{m12}$ .

$$q_{m2} = q_{m12} + q_{m1} \quad (14)$$

$$q_{m2} = q_{m3b} + q_{m3a} \quad (15)$$

$$q_{m12} = q_{m3a} + q_{m11b} \quad (16)$$

$$q_{m3b}(h_9 - h_8) = q_{m3a}(h_5 - h_6) \quad (17)$$

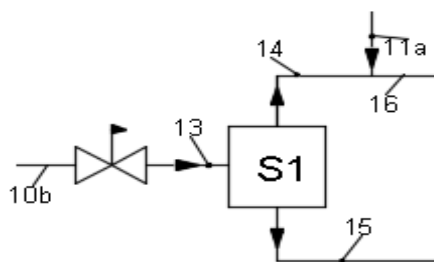
$$q_{m3b}(h_7 - h_{3b}) = q_{m11}(h_{10a} - h_{11}) \quad (18)$$

$$z = q_{m11b}/q_{m11} \quad (19)$$

Protoci će biti izračunati kasnije prilikom analize rada postrojenja za odabrani režim rada.

### 2.2.2. Separator S1

Struja  $10_b$  se ohladila prilikom prolaska kroz izmjenjivač topline te se prigušivanjem s 60 bar na tlak od 6 bar dobilo stanje  $13$  u mokrom području. S dna separatora se odvodi vrela kapljevina stanja  $15$ , a s vrha se odvodi suhozasićena para stanja  $14$ . Stanje  $14$  i stanje  $15$  su u ravnoteži i njihovi sastavi su dobiveni pomoću programa Refprop. Suhozasićena para stanja  $14$  se potom miješa sa strujom  $11_a$  te nastaje para stanja  $16$  koja ulazi u visokotlačnu kolonu. Vrela kapljevina iz separatora se dalje miješa s vrelom đibrom iz visokotlačne kolone te nastaje struja stanja  $18$  iz koje jedan se jedan dio odvodi kao komina nazad u visokotlačnu kolonu, a drugi dio odlazi kao komina u niskotlačnu kolonu. Separator S1 prikazan je na slici 6.



**Slika 6.** Separator S1



Masena bilanca separatora S1:

$$q_{m13} = q_{m14} + q_{m15} \quad (20)$$

Energijska bilanca separatora S1:

$$q_{m13} h_{13} = q_{m14} h_{14} + q_{m15} h_{15} \quad (21)$$

Uvrštavanjem masene bilance u energijsku dolazi se do jednadžbe:

$$q_{m14} = \frac{h_{13} - h_{15}}{h_{14} - h_{15}} q_{m13} \quad (22)$$

U tablici 3. nalaze se podaci za karakteristične točke separatora S1:

**Tablica 3.** Podaci za struje separatora S1

Točka	$p$ (bar)	$\vartheta$ (°C)	$h$ (kJ/kg)	$\xi$
10b	60	-170	-72,1	0,79
13	6	-174,5	-72,1	0,79
14	6	-174,5	88,6	0,88
15	6	-174,5	-86,6	0,76

Uvrštavanjem entalpija u jednadžbu dobiva se:

$$q_{m14} = \frac{h_{13} - h_{15}}{h_{14} - h_{15}} q_{m13} = \frac{-72,1 - (-86,6)}{88,6 - (-86,6)} q_{m13} = 0,083 q_{m13} \quad (23)$$

$$q_{m15} = (1 - 0,083) q_{m13} \quad (24)$$

Protok, entalpija i sastav struje 16 dobije se iz jednadžbi:

Masena bilanca:

$$q_{m16} = q_{m11a} + q_{m14} \quad (25)$$

Energijska bilanca:

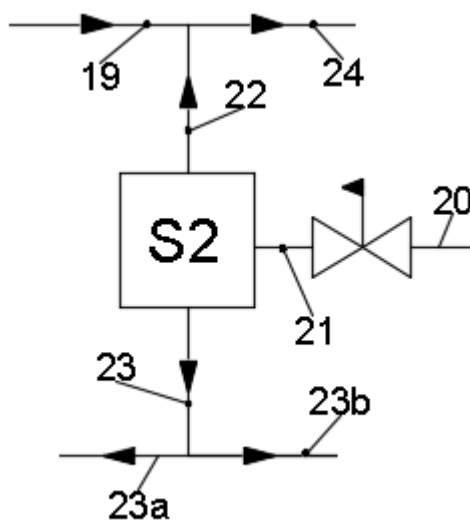
$$q_{m16} h_{16} = q_{m11a} h_{11a} + q_{m14} h_{14} \quad (26)$$

Bilanca dušika:

$$q_{m16} \xi_{16} = q_{m11a} \xi_{11a} + q_{m14} \xi_{14} \quad (27)$$

### 2.2.3. Separator S2

Struja 20 prigušuje se s 6 bar na 1,5 bar te tako nastala struja stanja 21 ulazi u separator S2. S dna separatora odvodi se vrele kapljevina stanja 23, a s vrha suhozasićena para stanja 22 koja se potom miješa sa suhozasićenom parom stanja 19 koja izlazi na vrhu niskotlačne kolone. Dio vrele kapljevine ulazi u niskotlačnu kolonu kako bi se ostvario potreban refleks, a dio izlazi kao gotov proizvod-ukapljeni dušik. Na slici 7. je prikazan separator S2.



Slika 7. Separator S2

U tablici 4. prikazana su stanja karakterističnih točaka separatora S2.

Tablica 4. Podaci za struje separatora S2

Točka	$p$ (bar)	$\vartheta$ (°C)	$h$ (kJ/kg)	$\zeta$
20	6	-176,8	-81,5	1
21	1,5	-192,3	-81,5	1
22	1,5	-192,3	79,7	1
23	1,5	-192,3	-114,8	1

Masena bilanca separatora S2:

$$q_{m21} = q_{m22} + q_{m23} \quad (28)$$

Energijska bilanca:

$$q_{m21} h_{21} = q_{m22} h_{22} + q_{m23} h_{23} \quad (29)$$

Uvrštavanjem masene bilance u energijsku dolazi se do jednadžbe:

$$q_{m22} = \frac{h_{21} - h_{23}}{h_{22} - h_{23}} q_{m21} = \frac{-81,5 - (-114,8)}{79,7 - (-114,8)} q_{m21} = 0,171 q_{m21} \quad (30)$$

$$q_{m23} = (1 - 0,171) q_{m21} \quad (31)$$

Protok, entalpija i sastav struje 24 dobije se iz jednadžbi:

Masena bilanca:

$$q_{m24} = q_{m19} + q_{m22} \quad (32)$$

Energijska bilanca:

$$q_{m24} h_{24} = q_{m19} h_{19} + q_{m22} h_{22} \quad (33)$$

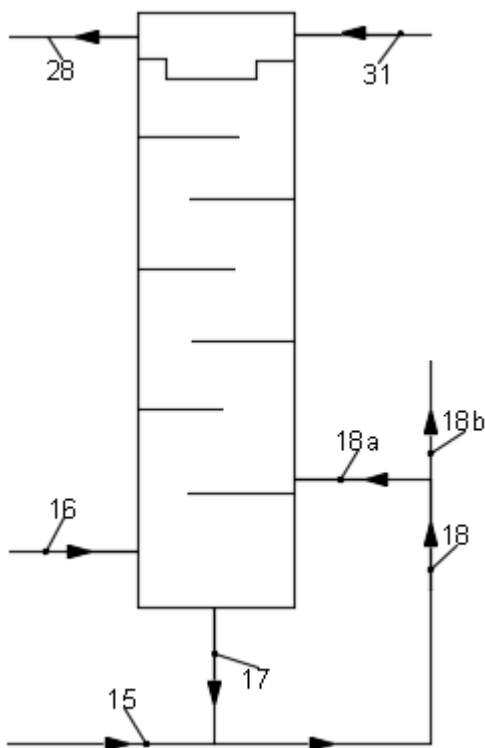
Bilanca dušika:

$$\zeta_{24} = \zeta_{19} = \zeta_{22} \quad (34)$$

Protok struje 23a koja ulazi u niskotlačnu kolonu će se dobiti iz bilanci za tu kolonu.

## 2.2.4. Visokotlačna kolona

Na vrhu visokotlačne kolone izlazi suhozasićena para čistog dušika 28 te ulazi vrela kapljevina čistog dušika 31. Na dnu izlazi vrela kapljevina koja sadrži 65% masenog udjela dušika. Kolona radi pri tlaku od 6 bar. Na slici 8. shematski je prikazana visokotlačna kolona:



**Slika 8.** Visokotlačna kolona

Omjer struja  $18a$  i  $18$  je jedan od parametara procesa i utvrdit će se za pojedini režim rada.

Masena bilanca:

$$q_{m31} + q_{m18a} + q_{m16} = q_{m28} + q_{m17} \quad (35)$$

Energijska bilanca:

$$q_{m31}h_{31} + q_{m18a}h_{18a} + q_{m16}h_{16} = q_{m28}h_{18} + q_{m17}h_{17} \quad (36)$$

Protoci  $17$ ,  $18$ ,  $18a$  te maseni udio dušika u struji  $18$  i entalpija struje  $18$  računaju se iz sljedećih bilanci:

Bilanca kisika za kolonu:

$$q_{m31}(1 - \xi_{31}) + q_{m18a}(1 - \xi_{18}) + q_{m16}(1 - \xi_{16}) = q_{m28}(1 - \xi_{28}) + q_{m17}(1 - \xi_{17}) \quad (37)$$

Masena bilanca struje 18:

$$q_{m18} = q_{m17} + q_{m15} \quad (38)$$

Masena bilanca dušika struje 18:

$$q_{m18}\zeta_{18} = q_{m17}\zeta_{17} + q_{m15}\zeta_{15} \quad (39)$$

Energijska bilanca struje 18:

$$q_{m18}h_{18} = q_{m17}h_{17} + q_{m15}h_{15} \quad (40)$$

Odnos struja 18a i 18:

$$q_{m18a} = X q_{m18} \quad (41)$$

Maseni protoci struja 28 i 31 računaju se iz masene i energijske jednadžbe za kolonu.

U tablici 5. se nalaze podaci za karakteristične točke visokotlačne kolone.

**Tablica 5.** Podaci za struje visokotlačne kolone

Točka	$p$ (bar)	$\vartheta$ (°C)	$h$ (kJ/kg)	$\zeta$
16	6	-173,6	74,4	
17	6	-173	-90	0,65
18a	6	-174,3	-88,5	
28	6	-176,8	87,2	1
31	6	-176,8	-81,5	1

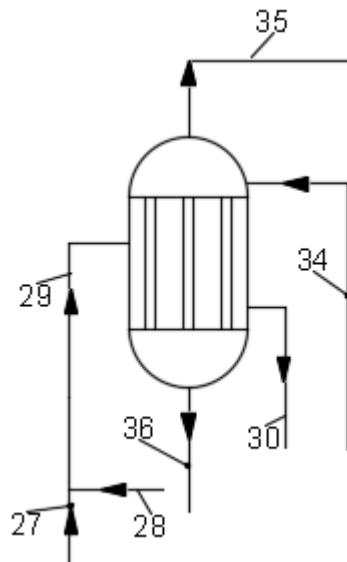
Maseni udjeli  $\zeta_{16}$ ,  $\zeta_{18a}$ , se dobiju nakon provedene analize.

Refluks u koloni se računa:

$$R_1 = \frac{q_{m31}}{q_{m28} - q_{m31}} \quad (42)$$

### 2.2.5. Kondenzator-isparivač

Kondenzacija struje dušika 29 služi za isparavanje struje kisika 35 koja potom ulazu u niskotlačnu kolonu za suhozasićena para. Kondenzirana struja dušika izlazi sa stanjem 30, a dio kisika koji nije ispario izlazi u struji 36. Kondenzator je prikazan na slici 9.



**Slika 9.** Kondenzator-isparivač

Protok struje 29 iznosi:

$$q_{m29} = q_{m27} + q_{m28} \quad (43)$$

Protoci dušika su jednaki:

$$q_{m29} = q_{m30} \quad (44)$$

Struja kisika dijeli se na:

$$q_{m34} = q_{m35} + q_{m36} \quad (45)$$

Iz jednakosti toplinskih tokova dolazi se do jednadžbe:

$$\Phi_{N_2} = \Phi_{O_2} \quad (46)$$

$$q_{m29} (h_{29} - h_{30}) = q_{m35} (h_{35} - h_{34}) \quad (47)$$

Iz prethodne jednadžbe računa se protok struje 35.

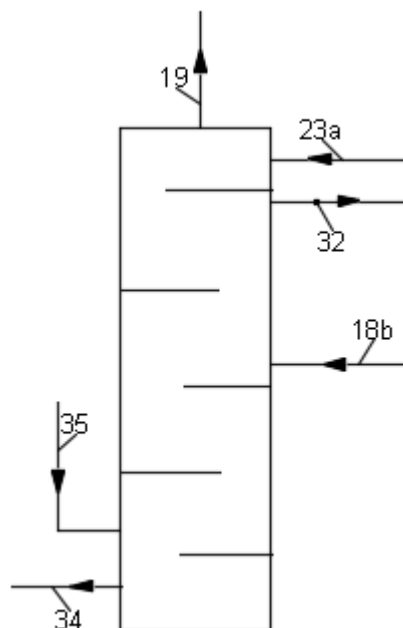
U tablici 6. prikazani su podaci za karakteristične točke kondenzatora-isparivača.

**Tablica 6.** Podaci za struje kondenzatora-isparivača

Točka	$p$ (bar)	$\vartheta$ (°C)	$h$ (kJ/kg)	$\xi$
29	6	-176,8	87,2	1
30	6	-176,8	-81,5	1
34	1,5	-179	-126,7	0
35	1,5	-179	82,4	0
36	1,5	-179	-126,7	0

### 2.2.6. Niskotlačna kolona

S vrha kolone se odvodi čisti dušik, a s dna kolone čisti kisik. Kolona radi na tlaku od 1,5 bar. Pri vrhu kolone odvodi se struja masenog udjela dušika između 95% i 100% koja nakon prolaska kroz izmjenjivač topline odlazi u apsorbere. Protok te struje je fiksni i iznosi 20% ukupnog protoka dušika u postrojenje. Na slici 10. shematski je prikazana niskotlačna kolona.

**Slika 10.** Niskotlačna kolona

Protok struje koja odlazi u apsorbere:

$$q_{m32} = 0,2 (0,79 q_{m1}) = 0,2 (0,79 \cdot 1400) = 221 \text{ kg/h} \quad (48)$$

Masena bilanca kolone:

$$q_{m23a} + q_{m18b} + q_{m35} = q_{m19} + q_{m32} + q_{m34} \quad (49)$$

Energijska bilanca kolone:

$$q_{m23a}h_{23a} + q_{m18b}h_{18b} + q_{m35}h_{35} = q_{m19}h_{19} + q_{m32}h_{32} + q_{m34}h_{34} \quad (50)$$

Iz masene i energijske bilance računaju se protoci 23a i 19.

Refluks u koloni se računa:

$$R_2 = \frac{q_{m23a}}{q_{m19} - q_{m23a}} \quad (51)$$

U tablici 7. nalaze se podaci za karakteristične točke niskotlačne kolone.

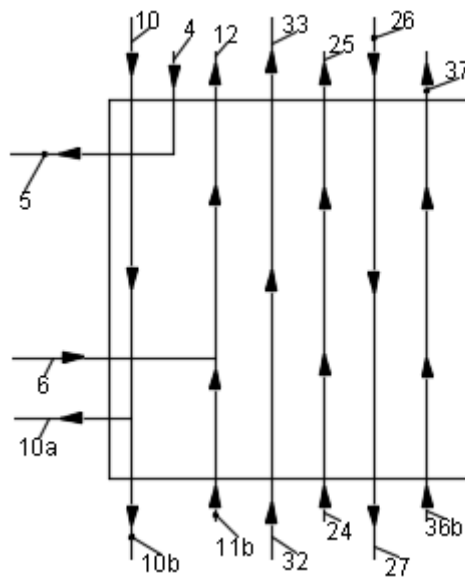
**Tablica 7.** Podaci za struje niskotlačne kolone

Točka	$p$ (bar)	$\vartheta$ (°C)	$h$ (kJ/kg)	$\xi$
18b	1,5	-190	-87,9	
19	1,5	-192,3	79,7	1
23a	1,5	-192,3	-114,8	1
32	1,5	-191	80,6	0,95
34	1,5	-179	-126,7	0
35	1,5	-179	82,4	0



### 2.2.7. Izmjenjivač topline

Struje 10a, 6, 32, 24 i 37 griju se prilikom prolaska kroz izmjenjivač te hlade ostale struje. Temperature struja koje se griju su na izlazu iz izmjenjivača približno jednake ulaznim temperaturama struja koje se hlade. Na slici 11. prikazan je izmjenjivač topline.



**Slika 11.** Izmjenjivač topline

Struje koje odaju toplinu ulaze s gornje strane na slici, a struje koje primaju toplinu ulaze na donjoj strani izmjenjivača na slici.

Ulazne veličine:

$$q_{m10}h_{10}, q_{m4}h_4, q_{m26}h_{26}, q_{m6}h_6, q_{m11b}h_{11b}, q_{m32}h_{32}, q_{m24}h_{24}, q_{m36b}h_{36b}$$

Izlazne veličine:

$$q_{m37}h_{37}, q_{m25}h_{25}, q_{m33}h_{33}, q_{m12}h_{12}, q_{m5}h_5, q_{m10a}h_{10a}, q_{m10b}h_{10b}, q_{m27}h_{27}$$

Jednaki protoci su:

$$q_{m4} = q_{m5} = q_{m6} \quad (52)$$

$$q_{m32} = q_{m33} \quad (53)$$

$$q_{m24} = q_{m25} \quad (54)$$

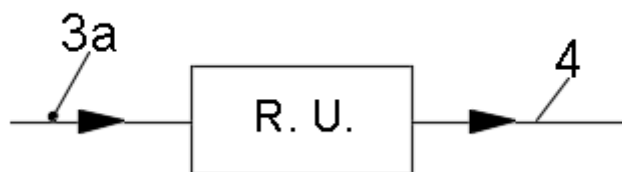
$$q_{m26} = q_{m27} \quad (55)$$

$$q_{m36b} = q_{m37} \quad (56)$$

Izjednačavanjem ulaznih i izlaznih veličina uz pretpostavku da u izmjenjivač ne ulazi niti iz njega izlazi toplinski tok dobiva se iznos protoka 37.

### 2.2.8. Rashladni uređaj

Zrak koji ulazi u turbinu T1 najprije prolazi kroz rashladni uređaj, a zatim kroz izmjenjivač topline. U analizi rada prikazan je utjecaj temperature iza rashladnog uređaja. Na slici 12. prikazan je rashladni uređaj R.U.



**Slika 12.** Rashladni uređaj

Odvedeni toplinski tok:

$$\Phi_{R.U.} = q_{m3a} (h_4 - h_{3a}) \quad (57)$$

### 3. ANALIZA RADA SUSTAVA

U ovom dijelu će se analizirati utjecaj parametara te utjecaj temperatura i tlakova na količine izlaznih proizvoda. Na kraju će se prikazati podaci za sve karakteristične točke procesa s obzirom na režim rada. U namjeri da se povećaju količine pojedinih proizvoda s obzirom na režim rada sustava odabrati će se različite kombinacije parametara, a da se i dalje osigura potreban refluks za obje kolone.

Parametri sustava su:

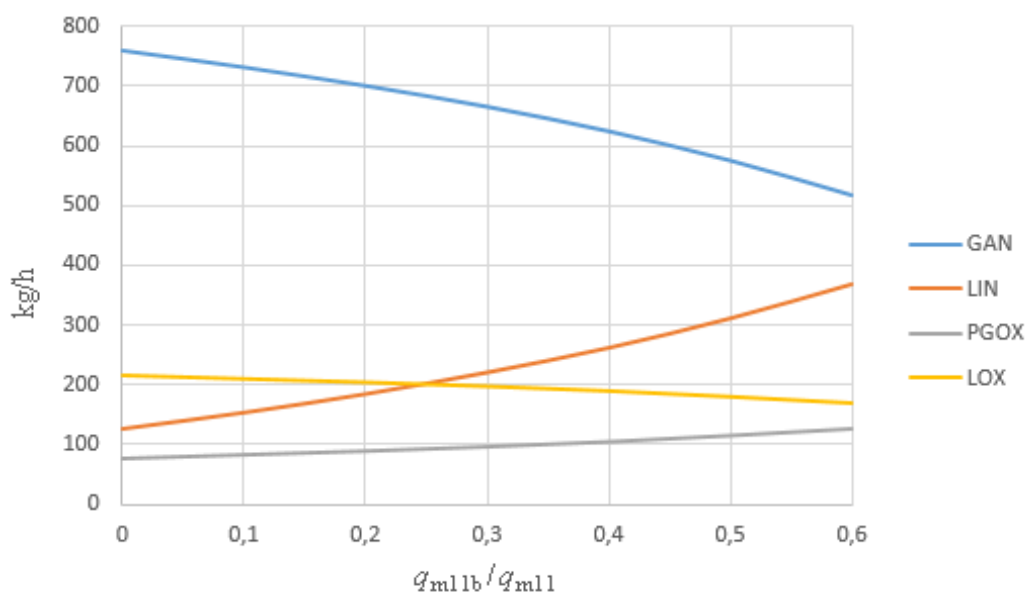
- odnos protoka *18a* i *18*
- odnos protoka *11b* i *11*
- odnos protoka *25b* i *25*

Svi parametri će se mijenjati između 0 i 0,6.

#### 3.1. Utjecaj parametara na izlazne količine proizvoda

U sljedećim dijagramima će biti prikazani utjecaji pojedinih odnosa protoka na izlazne količine proizvoda. Na slici 13. prikazan je utjecaj omjera protoka *11b* i *11* uz konstantne omjere:

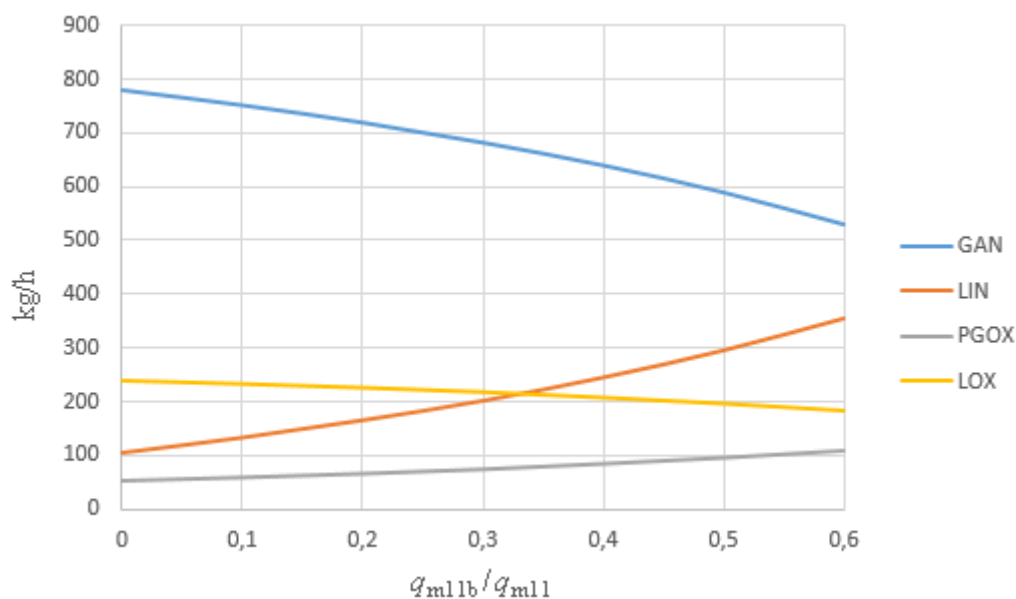
$$q_{m18a}/q_{m18} = 0,1 \quad q_{m25b}/q_{m25} = 0,35$$



**Slika 13.** Utjecaj omjera protoka *11b* i *11*

Na slici 14. prikazan je utjecaj omjera protoka  $11b$  i  $11$  uz konstantne omjere:

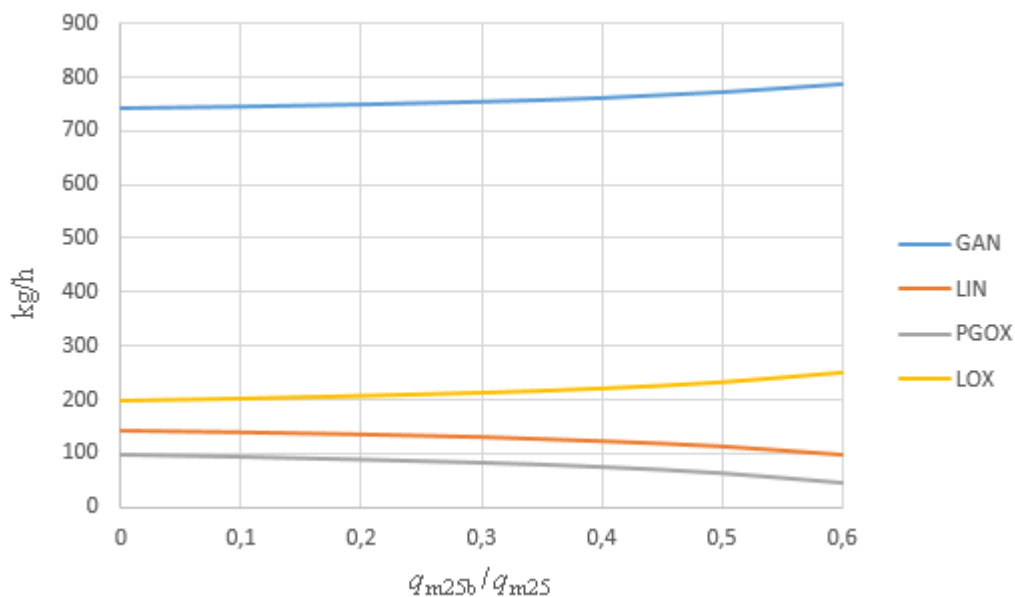
$$q_{m18a}/q_{m18} = 0,1 \quad q_{m25b}/q_{m25} = 0,55$$



**Slika 14.** Utjecaj omjera protoka  $11b$  i  $11$

Na slici 15. prikazan je utjecaj omjera protoka  $25b$  i  $25$  uz konstantne omjere:

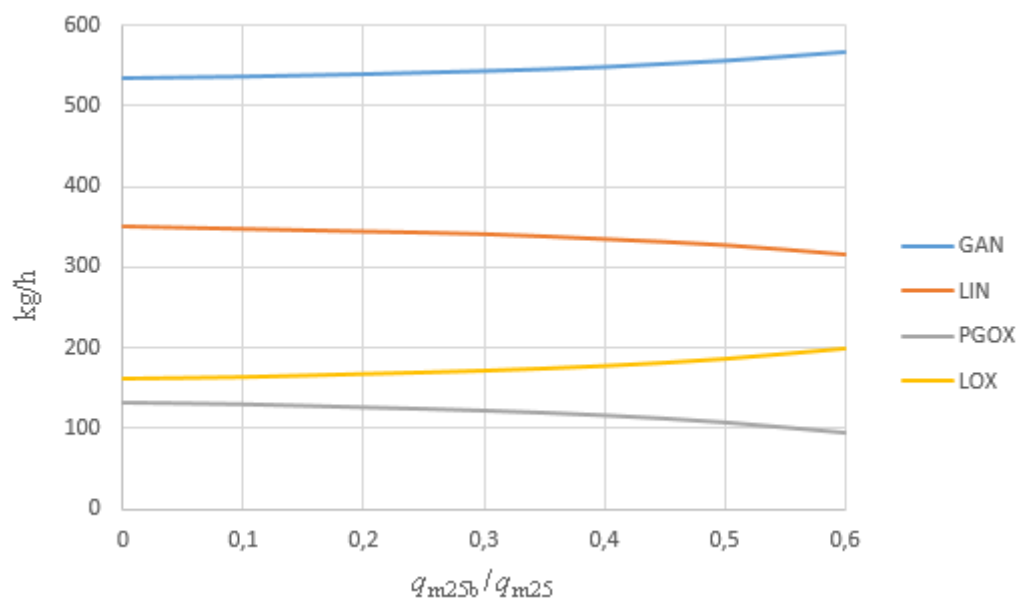
$$q_{m18a}/q_{m18} = 0,1 \quad q_{m11b}/q_{m11} = 0$$



**Slika 15.** Utjecaj omjera protoka  $25b$  i  $25$

Na slici 16. prikazan je utjecaj omjera protoka 25b i 25 uz konstantne omjere:

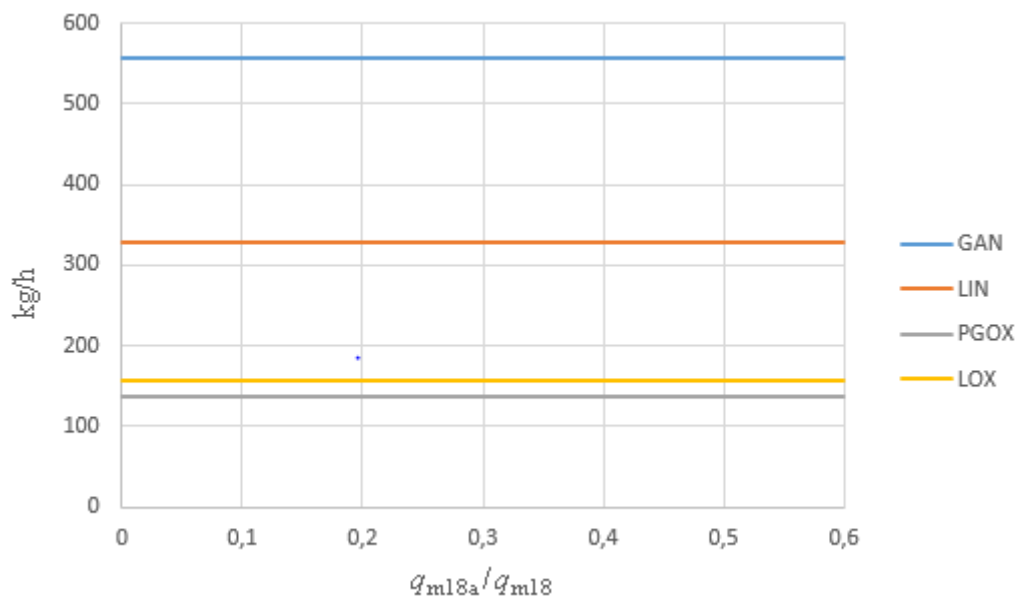
$$q_{m18a}/q_{m18}=0,1 \quad q_{m11b}/q_{m11}=0,55$$



**Slika 16.** Utjecaj omjera protoka 25b i 25

Na slici 17. prikazan je utjecaj omjera protoka 18a i 18 uz konstantne omjere:

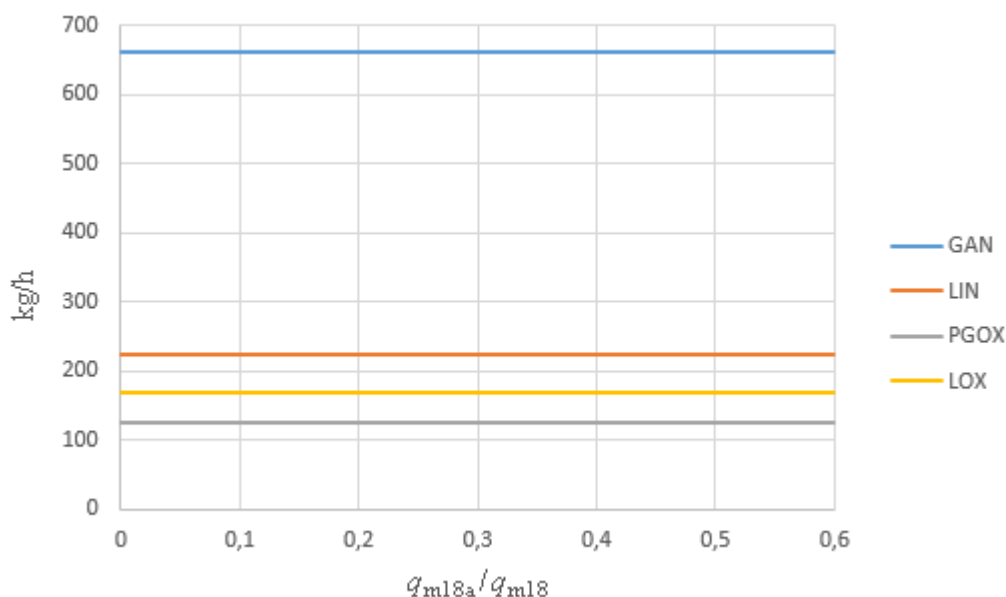
$$q_{m11b}/q_{m11}=0,55 \quad q_{m25b}/q_{m25}=0,55$$



**Slika 17.** Utjecaj omjera protoka 18a i 18

Na slici 18. prikazan je utjecaj omjera protoka 18a i 18 uz konstantne omjere:

$$q_{m11b}/q_{m11} = 0,3 \quad q_{m25b}/q_{m25} = 0,3$$



**Slika 18.** Utjecaj omjera protoka 18a i 18

Iz dijagrama 7. i 8. se vidi da se promjenom omjera protoka 18a i 18 ne mijenja količina izlaznih proizvoda, ali taj parametar se koristi za postizanje potrebnog refluksa u kolonama. Prilikom analize pazilo se da refluks bude veći od minimalnog za 15-50%. Izračuni minimalno potrebnih refluksa za pojedinu kolonu biti će prikazani u sljedećem poglavlju. Odnos protoka 25b i 25 jako malo utječe na količine izlaznih proizvoda, a razlog tome je što se povećanjem tog parametra mijenja protok struje dušika koji je kondenzira. Posljedica tog povećanja je veći protok kisika koji isparava, a to utječe i na ostale struje koje izlaze i ulaze u niskotlačnu kolonu. To sve na kraju dovodi i do promjene protoka struje 25. Različite količine proizvoda mogu se dobiti jedino promjenom odnosa protoka struja 11b i 11. Većim odnosom protoka 11b i 11 raste protok struje koja se nalazi u recirkulaciji te se povećava protok toplih struja koje ta struja u recirkulaciji hladi. Smanjenjem protoka struje 25 smanjuje se količina plinovitog dušika koji izlazi kao proizvod, a time raste količina ukapljenog dušika. Porastom protoka ulaznih toplih struja malo poraste i protok hladne struje plinovitog kisika zbog čega izlazi nešto manja količina ukapljenog kisika kao proizvoda.

### 3.2. Utjecaj odnosa protoka struja 18a i 18 na refluks

U tablici 8. prikazana je promjena stvarnog i minimalnog refluksa u kolonama.

$$q_{m11b}/q_{m11} = 0,55 \quad q_{m25b}/q_{m25} = 0,55$$

**Tablica 8.** Utjecaj odnosa protoka 18a i 18 na refluks u kolonama

	Visokotlačna kolona			Niskotlačna kolona		
$q_{m18a}/q_{m18}$	$R_{stv}$	$R_{min}$	$R_{stv}/R_{min} (%)$	$R_{stv}$	$R_{min}$	$R_{stv}/R_{min} (%)$
0	1,2427	0,9259	34	0,7787	0,7029	11
0,1	1,1054	0,9259	19	0,8283	0,7068	17
0,2	0,9601	0,9259	4	0,8924	0,7117	25
0,3	0,8060	0,9259	-13	0,9783	0,7183	36
0,4	0,6425	0,9259	-31	1,0993	0,7277	51
0,5	0,4687	0,9259	-49	1,2827	0,7418	73
0,6	0,2839	0,9259	-69	1,5933	0,7658	108

Vidi se da povećanjem odnosa protoka pada stvarni refluks u visokotlačnoj koloni a minimalni je konstantan, a u niskotlačnoj koloni se povećanjem odnosa protoka povećava i odnos stvarnog i minimalnog refluksa.

### 3.3. Utjecaj temperatura u turbinama T1 i T2 i rashladnom uređaju

Temperatura na izlazu iz rashladnog uređaja utječe direktno na količinu komprimiranog kisika. Smanjenjem te temperature smanjuje se temperatura s kojom struja 4 ulazi u izmjenjivač topline te je manji toplinski tok koji se može odvesti za grijanje struje kisika. To je razlog smanjenja količine plinovitog kisika, a povećanja kapljevito kisika. Analiza se provodi za odabrane parametre zato što većina režima radi pri tim parametrima. U tablici 9. prikazan je utjecaj temperature na izlazu iz rashladnog uređaja R.U. uz zadane parametre.

$$q_{m18a}/q_{m18}=0,1 \quad q_{m11b}/q_{m11} = 0,55 \quad q_{m25b}/q_{m25} = 0,55$$

**Tablica 9.** Utjecaj temperature na izlazu iz R.U.

$\vartheta_4$ (°C)	GAN (kg/h)	LIN (kg/h)	PGOX (kg/h)	LOX (kg/h)
5	557	328	108	186
0	557	328	92	202
-5	557	328	75	219
-10	557	328	58	236
-15	557	328	34	260

Iz tablice se vidi da će spuštanjem temperature ispod -15°C iščeznuti protok plinovitog kisika zato što neće biti dovoljno toplinskog toka da dio kapljevito kisika pređe u plinovito stanje. Smanjenjem temperature na izlazu iz rashladnog uređaja raste toplinski tok koji je potrebno odvesti, a time raste i potrebna snaga kompresora rashladnog uređaja za odabrani faktor hlađenja. To je prikazano u tablici 10.

$$\varepsilon_o = \frac{\Phi}{P} \quad (58)$$

$$\Phi = q_{m3a} (h_4 - h_{3a}) \quad (59)$$

**Tablica 10.** Utjecaj temperature  $\vartheta_4$  na odvedeni toplinski tok

$\vartheta_4$ (°C)	$\varepsilon_o$	$\Phi$ (kW)	$P$ (kW)
5	4	7,4	1,9
0	4	9,2	2,3
-5	4	11,1	2,8
-10	4	12,9	3,2
-15	4	14,8	3,7

U tablici 11. prikazan je utjecaj temperature struje 5 na ulazu u turbinu T1 uz zadane parametre:

$$q_{m18a}/q_{m18} = 0,1 \quad q_{m11b}/q_{m11} = 0,55 \quad q_{m25b}/q_{m25} = 0,55$$

**Tablica 11.** Utjecaj temperature na ulazu u turbinu T1

$\vartheta_5$ (°C)	GAN (kg/h)	LIN (kg/h)	PGOX (kg/h)	LOX (kg/h)
-10	557	328	108	186
-15	557	328	106	188
-20	557	328	103	191
-25	557	328	99	195



U tablici 12. prikazan je utjecaj temperature struje  $10a$  na ulazu u turbinu T2 uz zadane parametre:

$$q_{m18a}/q_{m18} = 0,1 \quad q_{m11b}/q_{m11} = 0,55 \quad q_{m25b}/q_{m25} = 0,55$$

**Tablica 12.** Utjecaj temperature na ulazu u turbinu T2

$\vartheta_{10a}$ (°C)	GAN (kg/h)	LIN (kg/h)	PGOX (kg/h)	LOX (kg/h)
-80	487	398	290	4
-85	501	384	253	41
-90	517	368	213	81
-95	536	349	164	130
-100	557	328	108	186

U tablici 11. vidi se utjecaj pada temperature na ulazu u turbinu T1. Padom temperature na ulazu u turbinu T1 pada specifični tehnički rad turbine te se smanjuje protok kroz kompresor K3. Ako je manji protok  $3_b$  onda će biti potreban manji protok hladne struje kisika koja prolazi kroz izmjenjivač, a to dovodi do povećanja ukapljenog kisika kao proizvoda. Promjenom temperature na ulazu u turbinu T1 ne mijenja se na izlazne protoke dušika. Promjena temperature na ulazu u turbinu T2 slično utječe u malo većoj mjeri na izlazne količine. Padom temperature na ulazu u turbinu pada specifični tehnički rad što dovodi do povećanja protoka kroz turbinu, a s time ostaje manje struje koja odlazi u separator S1. Zbog manjeg protoka struje  $10_b$  potreban je manji protok hladne struje kisika kroz izmjenjivač što dovodi do povećanja izlazne količine ukapljenog kisika. Smanjenjem protoka struje koja odlazi u separator smanjuje se napajanje kolona, a time raste potreban refluks. Zbog povećanog refluksa u niskotlačnoj koloni manji je protok ukapljenog dušika koji izlazi kao proizvod.

### 3.4. Utjecaj parametara i temperatura na procesne veličine sustava

Ovdje će biti prikazan utjecaj parametara i temperatura na snage kompresora. Snage dobivene u turbinama jednake su snagama koje se preko vratila dovode kompresorima. Kompresor K1 se sastoji od više kompresora i rashladnih uređaja nakon svake kompresije, ali je radi jednostavnosti prikazan kao jedan kompresor.

$$q_{m18a}/q_{m18} = 0,1 \quad q_{m25b}/q_{m25} = 0,55$$

**Tablica 13.** Utjecaj odnosa protoka  $II_b$  i  $II$  na snage kompresora

$q_{m11b}/q_{m11}$	$P_{k1}$ (kW)	$P_{k2}$ (kW)	$P_{k3}$ (kW)	$P_{k4}$ (kW)
0	201	13	18	41
0,1	214	14	19	39
0,2	229	15	21	38
0,3	246	16	22	36
0,4	266	18	24	33
0,5	289	19	26	31
0,6	317	21	29	28

U tablici 14. prikazan je utjecaj temperature struje 5 na ulazu u turbinu T1 uz zadane parametre:

$$q_{m18a}/q_{m18} = 0,1 \quad q_{m11b}/q_{m11} = 0,55 \quad q_{m25b}/q_{m25} = 0,55$$

**Tablica 14.** Utjecaj temperature na ulazu u turbinu T1 na snage kompresora

$\vartheta_5$ (°C)	$P_{k1}$ (kW)	$P_{k2}$ (kW)	$P_{k3}$ (kW)	$P_{k4}$ (kW)
-10	303	20	27	29
-15	298	20	27	29
-20	294	20	27	29
-25	290	20	27	29

Promjenom temperature na ulazu u turbinu T1 mijenja se jedino snaga potrebna za kompresor K1, a ostale snage se ne mijenjaju. Smanjenjem ulazne temperature u turbinu T1 povećava se apsolutna vrijednost specifičnog tehničkog rada turbine, a smanjuje se protok kroz turbinu tako da snaga ostaje ista. Protok  $q_{m3b}$  ostaje nepromijenjen. To je prikazano u tablici 15.

**Tablica 15.** Utjecaj temperature na ulazu u turbinu T1 na specifični tehnički rad turbine T1

$\vartheta_5$ (°C)	$w_{teh}$ (kJ/kg)	$q_{m3a}$ (kg/s)	$P_{T1}$ (kW)
-10	78,3	0,349	27
-15	81,5	0,336	27
-20	84,7	0,323	27
-25	87,8	0,312	27

U tablici 16 prikazan je utjecaj temperature na ulazu u turbinu T2 na snage kompresora

**Tablica 16.** Utjecaj temperature na ulazu u turbinu T2 na snage kompresora

$\vartheta_{10a}$ (°C)	$P_{k1}$ (kW)	$P_{k2}$ (kW)	$P_{k3}$ (kW)	$P_{k4}$ (kW)
-80	372	25	34	50
-85	349	23	32	43
-90	331	22	30	38
-95	316	21	29	33
-100	303	20	27	29

Promjenom temperature na ulazu u turbinu T2 mijenjaju se sve snage kompresora zato što se promjenom te temperature mijenja specifični tehnički rad turbine T2, a on utječe na sve ostale protoke struja.

### 3.5. Režimi rada

Promjenom ulaznih parametara dolazi se do povećanja protoka pojedinog proizvoda, a da se pri tom zadovolji odnos stvarnog i minimalnog refluksa.

#### 3.5.1. Ukapljeni dušik

Prilikom analize gore navedenih dijagrama dobiva se kombinacija parametara koja naglašava proizvodnju ukapljenog dušika, a da pri tome bude zadovoljen odnos stvarnog i minimalnog refluksa.

$$q_{m18a}/q_{m18} = 0,1 \quad q_{m11b}/q_{m11} = 0,55 \quad q_{m25b}/q_{m25} = 0,55$$

U tablici 17. prikazani su podaci za pojedine točke procesa kada je naglasak na proizvodnji ukapljenog dušika.

**Tablica 17.** Podaci za režim proizvodnje ukapljenog dušika

Točka	$q_m$ (kg/h)	$h$ (kJ/kg)	$\zeta$ (kg/kg)	$p$ (bar)	$\vartheta$ (°C)
1	1400	301,2	0,79	1	25,0
2	3364	301,2	0,79	1	25,0

3	3364	295,8	0,79	25	25,0
3a	1258	295,8	0,79	25	25,0
3b	2106	295,8	0,79	25	25,0
4	1258	274,6	0,79	25	5,0
5	1258	258,7	0,79	25	-10,0
6	1258	180,4	0,79	6	-91,0
7	2106	330,5	0,79	38	63,4
8	2106	293	0,79	38	25,0
9	2106	339,8	0,79	60	71,8
10	2106	288,4	0,79	60	25,0
10a	1283	130,5	0,79	60	-100,0
10b	822	-72,1	0,79	60	-170,0
11	1283	73,6	0,79	6	-173,1
11a	578	73,6	0,79	6	-173,1
11b	706	73,6	0,79	6	-173,1
12	1964	298	0,79	6	23,0
13	822	-72,1	0,79	6	-174,5
14	68	88,6	0,88	6	-174,5
15	755	-86,6	0,76	6	-174,5
16	645	75,2	0,8	6	-173,6
17	474	-90	0,65	6	-173,0
18	1229	-87,9	0,72	6	-174,3
18a	123	-87,9	0,72	6	174,3
18b	1106	-87,9	0,72	1,5	-190,0
19	1080	79,7	1	1,5	-192,3
20	980	-81,5	1	6	-176,8
21	980	-81,5	1	1,5	-192,3
22	168	79,7	1	1,5	-192,3
23	813	-114,8	1	1,5	-192,3
23a	489	-114,8	1	1,5	-192,3
23b	323	-114,8	1	1,5	-192,3
24	1248	79,7	1	1,5	-192,3

25	1248	304	1	1,5	20,0
25a	562	304	1	1,5	20,0
25b	687	304	1	1,5	20,0
26	687	308,2	1	6	25,0
27	687	87,2	1	6	-176,8
28	619	87,2	1	6	176,8
29	1305	87,2	1	6	-176,8
30	1305	-81,5	1	6	-176,8
31	325	-81,5	1	6	-176,8
32	221	80,6	0,95	1,5	-191,0
33	221	304	1	1,5	20,0
34	1347	-126,7	0	1,5	-179,0
35	1053	82,4	0	1,5	-179,0
36	294	-126,7	0	1,5	-179,0
36a	162	-126,7	0	1,5	-179,0
36b	132	-126,7	0	1,5	-179,0
37	132	266,3	0	1,5	20,0
38	132	210,3	0	150	20

Maseni protok ukapljenog dušika iznosi:

$$q_{m23b} = 323 \text{ kg/h} \quad (60)$$

Ukupan dušik koji ulazi u sustav:

$$q_{mN2} = 0,79 q_{m1} = 1106 \text{ kg/h} \quad (61)$$

Odnos izlaznog ukapljenog dušika i ulaznog dušika:

$$q_{m23b} / q_{mN2} = 29\% \quad (62)$$

U ovom režimu rada vidi se da samo 30 % ulaznog dušika izlazi kao ukapljeni proizvod, a da pri tome budu zadovoljeni refluksi u kolonama. 20 % dušika odlazi u apsorbere, a 51 % izlazi u plinovitom stanju. U tablici 18. su navedene potrebne snage kompresora za ovaj režim rada.

**Tablica 18.** Snage kompresora u režimu ukapljenog dušika

$P_{k1}$ (kW)	$P_{k2}$ (kW)	$P_{k3}$ (kW)	$P_{k4}$ (kW)
303	20	27	29

### 3.5.2. Komprimirani plinoviti kisik

Prilikom analize gore navedenih dijagrama dobiva se kombinacija parametara koja naglašava proizvodnju komprimiranog kisika, a da pri tome bude zadovoljen odnos stvarnog i minimalnog refluksa.

$$q_{m18a}/q_{m18} = 0,1 \quad q_{m11b}/q_{m11} = 0,55 \quad q_{m25b}/q_{m25} = 0,55$$

Parametri su isti kao u režimu za ukapljeni dušik pa i za ovaj režim vrijede isti podaci iz tablice.

Maseni protok komprimiranog plinovitog kisika iznosi:

$$q_{m37} = 132 \text{ kg/h} \quad (63)$$

Ukupan kisik koji ulazi u sustav:

$$q_{mO2} = 0,21 \quad q_{m1} = 294 \text{ kg/h} \quad (64)$$

Odnos komprimiranog plinovitog kisika i ukupnog kisika:

$$q_{m37} / q_{mO2} = \frac{132}{294} = 45 \% \quad (65)$$

### 3.5.3. Komprimirani plinoviti kisik i ukapljeni dušik

Budući da ova dva režima rada zahtijevaju jednake ulazne parametre moći će se istovremeno proizvoditi ukapljeni dušik i ukapljeni plinoviti kisik

### 3.5.4. Ukapljeni kisik

Prilikom analize gore navedenih dijagrama dobiva se kombinacija parametara koja naglašava proizvodnju ukapljenog kisika, a da pri tome bude zadovoljen odnos stvarnog i minimalnog refluksa.

$$q_{m18a}/q_{m18} = 0,1 \quad q_{m11b}/q_{m11} = 0 \quad q_{m25b}/q_{m25} = 0,35$$

U tablici 19. prikazani su podaci za pojedine točke procesa kada je naglasak na proizvodnji ukapljenog kisika.

**Tablica 19.** Podaci za režim proizvodnje ukapljenog kisika

Točka	$q_m$ (kg/h)	$h$ (kJ/kg)	$\xi$ (kg/kg)	$p$ (bar)	$\vartheta$ (°C)
1	1400	301,2	0,79	1	25,0

2	2236	301,2	0,79	1	25,0
3	2236	295,8	0,79	25	25,0
3a	836	295,8	0,79	25	25,0
3b	1400	295,8	0,79	25	25,0
4	836	274,6	0,79	25	5,0
5	836	258,7	0,79	25	-10,0
6	836	180,4	0,79	6	-91,0
7	1400	330,5	0,79	38	63,4
8	1400	293	0,79	38	25,0
9	1400	339,8	0,79	60	71,8
10	1400	288,4	0,79	60	25,0
10a	853	130,5	0,79	60	-100,0
10b	547	-72,1	0,79	60	-170,0
11	853	73,6	0,79	6	-173,1
11a	853	73,6	0,79	6	-173,1
11b	0	73,6	0,79	6	-173,1
12	836	298	0,79	6	23,0
13	547	-72,1	0,79	6	-174,5
14	45	88,6	0,88	6	-174,5
15	502	-86,6	0,76	6	-174,5
16	898	75,2	0,8	6	-173,6
17	623	-90	0,65	6	-173,0
18	1125	-87,9	0,72	6	-174,3
18a	112	-87,9	0,72	6	174,3
18b	1012	-87,9	0,72	1,5	-190,0
19	1029	79,7	1	1,5	-192,3
20	796	-81,5	1	6	-176,8
21	796	-81,5	1	1,5	-192,3
22	136	79,7	1	1,5	-192,3
23	659	-114,8	1	1,5	-192,3
23a	532	-114,8	1	1,5	-192,3
23b	127	-114,8	1	1,5	-192,3

24	1165	79,7	1	1,5	-192,3
25	1165	304	1	1,5	20,0
25a	758	304	1	1,5	20,0
25b	408	304	1	1,5	20,0
26	408	308,2	1	6	25,0
27	408	87,2	1	6	-176,8
28	857	87,2	1	6	176,8
29	1265	87,2	1	6	-176,8
30	1265	-81,5	1	6	-176,8
31	469	-81,5	1	6	-176,8
32	221	80,6	0,95	1,5	-191,0
33	221	304	1	1,5	20,0
34	1314	-126,7	0	1,5	-179,0
35	1020	82,4	0	1,5	-179,0
36	294	-126,7	0	1,5	-179,0
36a	196	-126,7	0	1,5	-179,0
36b	98	-126,7	0	1,5	-179,0
37	98	266,3	0	1,5	20,0
38	98	210,3	0	150	20

Maseni protok ukapljenog kisika iznosi:

$$q_{m36a} = 196 \text{ kg/h} \quad (66)$$

Odnos ukapljenog kisika i ukupnog kisika:

$$q_{m36a} / q_{mO_2} = \frac{196}{294} = 67 \% \quad (67)$$

Za razliku od režima ukapljenog dušika ovdje veći dio kisika izlazi u ukapljenom stanju, a da pri tome budu zadovoljeni refluksi u kolonama. 33 % kisika izlazi u plinovitom stanju. U tablici 20. su navedene potrebne snage kompresora za ovaj režim rada.

**Tablica 20.** Snage kompresora u režimu ukapljenog kisika

$P_{k1}$ (kW)	$P_{k2}$ (kW)	$P_{k3}$ (kW)	$P_{k4}$ (kW)
201	13	18	17



Zaključno se može reći da se veći dio kisika može dobiti u kapljenom stanju za razliku od dušika i da pri tome bude potrebna manja snaga za pogon kompresora jer u se u režimu ukapljenog kisika zahtijevaju manji protoci u sustavu. U tablici 21. prikazane su potrebne snage za pogon kompresora i protok struje u recirkulaciji za pojedine režime.

**Tablica 21.** Usporedba pojedinih režima

Režimi	$P_{k1}$ (kW)	$P_{k2}$ (kW)	$P_{k3}$ (kW)	$P_{k4}$ (kW)	$q_{m12}$ (kg/h)
ukapljeni dušik	303	20	27	29	1964
komprimirani kisik	303	20	27	29	1964
ukapljeni dušik i komprimirani kisik	303	20	27	29	1964
ukapljeni kisik	201	13	18	17	836

## 4. ODREĐIVANJE BROJA PLITICA

Za određivanje teorijskog broja plitica najčešće se koristi McCabe-Thieleov postupak jer nije uvijek dostupan Merkelov  $h$ - $\psi$  dijagram. Osnovna pretpostavka McCabe-Thieleove metode je konstantnost tokova oborine i pare na svim pliticama kolone. Taj postupak s najboljom točnošću odgovara smjesama s jednakim toplinama isparivanja obiju komponenti i usporednim linijama vrenja i rošenja ali se s dovoljnom točnošću može primijeniti na smjese koje od toga odstupaju.

### 4.1. Složena destilacija

Postupke složene destilacije koristimo kada osim đibre i destilata odvodimo još neke tokove iz kolone i kada imamo više tokova kojima napajamo kolonu. Biti će prikazan postupak H.Z. Kistera koji dijeli kolonu na  $N+1$  sekciju[3].  $N$  je zbroj bočnih dovodenja napajanja, odvođenja bočnih produkata ili odvođenja topline. Ukoliko ima odvođenja bočnih produkata onda se njihov protok uvrštava s minusom u jednadžbe.

Protok kapljevine u sekciji  $j$ :

$$q_{nL,j} = R q_{nD} + \sum_{k=1}^{j-1} (q_k q_{nF,k}) \quad (68)$$

Protok pare u sekciji  $j$ :

$$q_{nV,j} = (R+1) q_{nD} + \sum_{k=1}^{j-1} (q_k - 1) q_{nF,k} \quad (69)$$

Član  $q_{nF,k}$  predstavlja napajanje ili bočni proizvod kolone.

Presjecište radne linije s dijagonalom McCabe-Thieleova dijagrama:

$$\psi_{fd} = \frac{\sum_{k=1}^{j-1} (q_{nF,k} \psi_k') - q_{nD} \psi_k}{\sum_{k=1}^{j-1} q_{nF,k} - q_{nD}} \quad (70)$$

Pravac napajanja:

$$\psi_{df} = \frac{q_k}{q_k - 1} \psi_{fd} - \frac{\psi_{F,k}}{q_k - 1} \quad (71)$$

Presjecište radne linije i ordinate McCabe-Thieleovog dijagrama:

$$\psi_{df(0),j} = \frac{\psi_D - \sum_{k=1}^{j-1} \frac{q_{nF,k}}{q_{nD}} \psi_{F,k}}{(R+1) + \sum_{k=1}^{j-1} \frac{q_{nF,k}}{q_{nD}} (q_k - 1)} \quad (72)$$

Jednadžba se može preurediti da se uvrštavanjem minimalnih vrijednosti odsječaka na ordinati dobiva minimalna vrijednost refluksa:

$$R_{\min,j} = \frac{\psi_D - \sum_{k=1}^{j-1} \frac{q_{nF,k}}{q_{nD}} \psi_{F,k}}{\psi_{df(0)\min,j}} - \sum_{k=1}^{j-1} \frac{q_{nF,k}}{q_{nD}} (q_k - 1) - 1 \quad (73)$$

$q_k$  predstavlja toplinsko stanje napajanja ili odvođenja toka i računa se preko entalpija:

$$q_k = \frac{h'' - h_M}{h'' - h'} \quad (74)$$

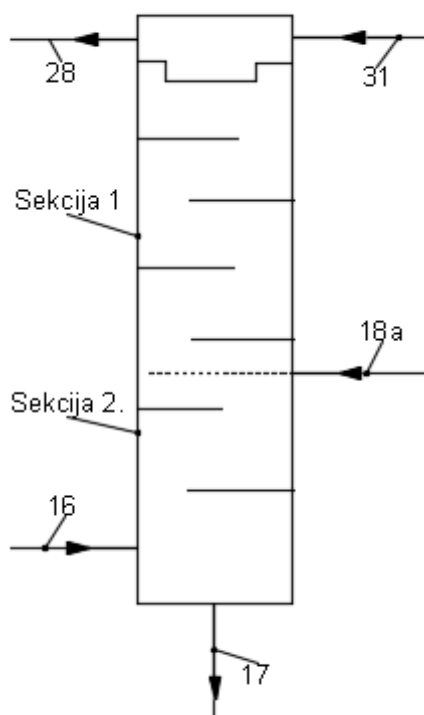
## 4.2. Potreban broj plitica u pojedinom režimu rada

Parametri procesa u režimu dobivanja komprimiranog plinovitog kisika jednaki su parametrima za režim dobivanja ukapljenog dušika pa će stoga i broj plitica kolona biti jednak za ta dva režima. U McCabe-Thieleovom postupku nije moguće ucrtavati plitice do potpuno čiste komponente pa će se prestati s ucrtavanjem kada koncentracija dušika pređe 99,9 %.

### 4.2.1. Ukapljeni dušik (LIN)

#### 4.2.1.1. Visokotlačna kolona

Na slici 19. shematski je prikazana podjela visokotlačne kolone u dvije sekcije.



**Slika 19.** Podjela visokotlačne kolone u 2 sekcije

Refluks u koloni računa se iz jednadžbe (42).

$$R_1 = \frac{325}{619 - 325} = 1,1054 \quad (75)$$

Potrebno je masene udjele dušika  $\zeta$  pretvoriti u količinske udjele  $\Psi$  te masene protoke  $q_m$  u količinske protoke  $q_n$ .

Količinski protoci se dobiju iz jednadžbe:

$$q_n = \frac{Q_m}{M} \quad (76)$$

Pretvorba u količinske udjele vrši se pomoću:

$$\Psi = \frac{n_2}{n_1 + n_2} = \frac{\frac{m_2}{M_2}}{\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\xi} - 1\right) \frac{M_2}{M_1} + 1} \quad (77)$$

Protok destilata se računa pomoću:

$$q_{mD} = q_{m28} - q_{m31} = 619 - 325 = 294 \text{ kg/h} \quad (78)$$

U tablici 22. nalaze se podaci za destilat i struju napajanja kolone.

**Tablica 22.** Podaci za destilat i struju napajanja

Točka	$q_m$ (kg/h)	$M$ (kg/kmol)	$q_n$ (kmol/h)	$\Psi$ (kmol/kmol)
D	294	28,016	10,5	1
18a(F)	123	29,101	4,2	0,74

U tablici 23. nalaze se podaci za vrelu kapljevinu i suhozasićenu paru struje 18a

**Tablica 23.** Podaci za zasićeno stanje struje 18a

Točka	$h'$ (kJ/kg)	$h''$ (kJ/kg)	$h_M$ (kJ/kg)
18a	-87,7	89	-87,9

Toplinsko stanje napajanja je:

$$q_1 = \frac{h'' - h_M}{h'' - h'} = \frac{89 - (-87,9)}{89 - (-87,7)} = 1,001 \quad (79)$$

Nagib pravca napajanja je:

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{q_1}{q_1 - 1} = \frac{1}{1 - 1} = \frac{1}{0} = +\infty \quad (80)$$

$$\alpha = 90^\circ \quad (81)$$

Presjecišta radnih linija s dijagonalom McCabe-Thieleovog dijagrama iz jednadžbe:

Sekcija 1:

$$\Psi_{fd,1} = \frac{-q_{mD}\Psi_D}{-q_{mD}} = \frac{-10,5 \cdot 1}{-10,5} = 1 \text{ kmol/kmol} \quad (82)$$

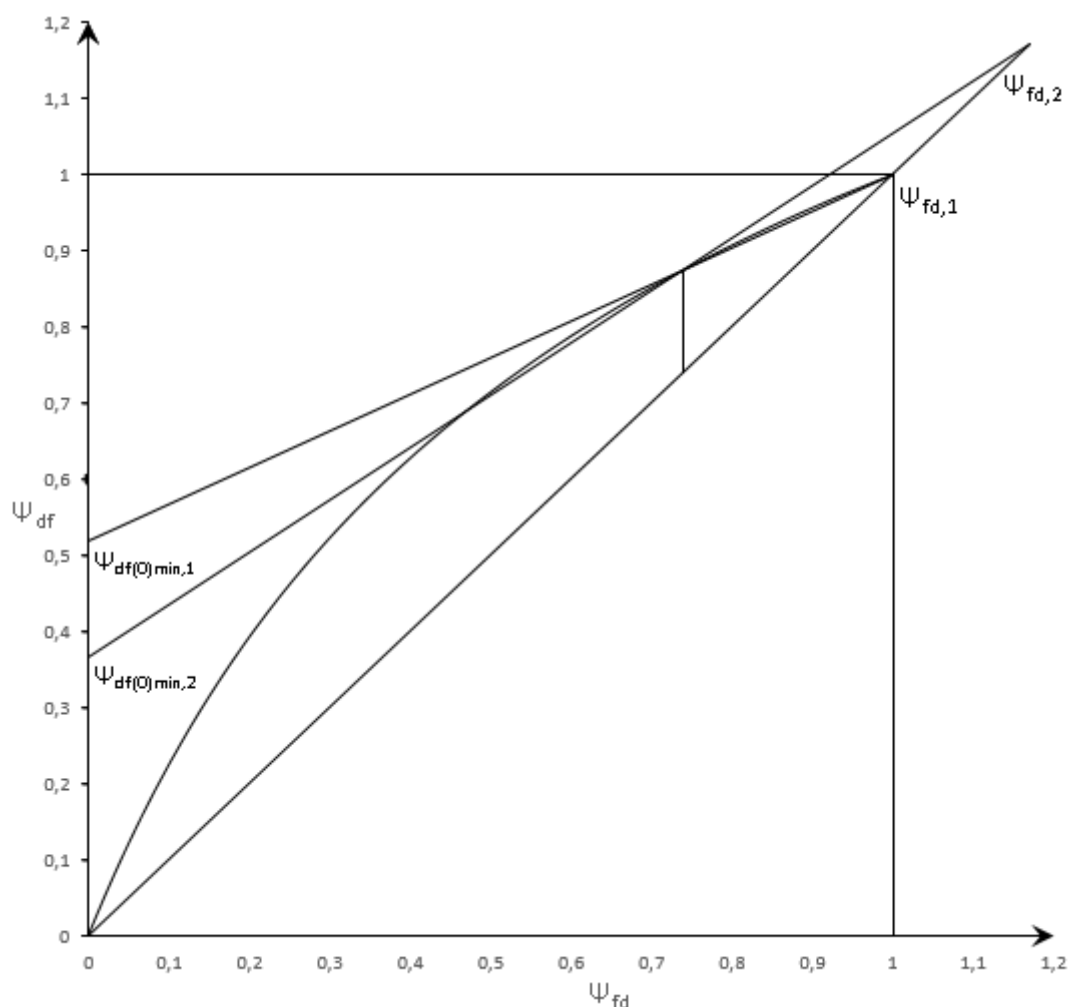
Sekcija 2:

$$\Psi_{fd,2} = \frac{q_{df} \Psi_f - q_{nd} \Psi_D}{q_{df} - q_{nd}} = \frac{4,2 \cdot 0,74 - 10,5 \cdot 1}{4,2 - 10,5} = 1,17 \text{ kmol/kmol} \quad (83)$$

U dijagram se ucrtavaju pravci koji prolaze kroz presjecišta radnih linija s dijagonalom i presjecišta linija napajanja s ravnotežnom linijom. Nakon ucrtavanja tih pravaca određuje se njihov odsječak na osi ordinata. Postupak je prikazan na slici 20. Očitane su vrijednosti:

$$\Psi_{df(0)\min,1} = 0,52 \text{ kmol/kmol} \quad (84)$$

$$\Psi_{df(0)\min,2} = 0,37 \text{ kmol/kmol} \quad (85)$$



**Slika 20.** Odsječci pravaca na ordinati

Uvrštavanjem minimalnih vrijednosti odsječaka u jednadžbu dobiva se minimalna vrijednost refleksa,

Minimalni refluks u sekciji 1:

$$R_{\min,1} = \frac{\Psi_D}{\Psi_{df(0)\min,1}} - 1 = \frac{1}{0,52} - 1 = 0,9259 \quad (86)$$

Minimalni refluks u sekciji 2:

$$R_{\min,2} = \frac{\Psi_D - \frac{q_{nF}}{q_{nD}} \Psi_F}{\Psi_{df(0)\min,2}} - \frac{q_{nF}}{q_{nD}} (q_1 - 1) - 1 \quad (87)$$

$$= \frac{1 - \frac{4,2}{10,5} 0,74}{0,37} - \frac{4,2}{10,5} (1,001 - 1) - 1 = 0,9188$$

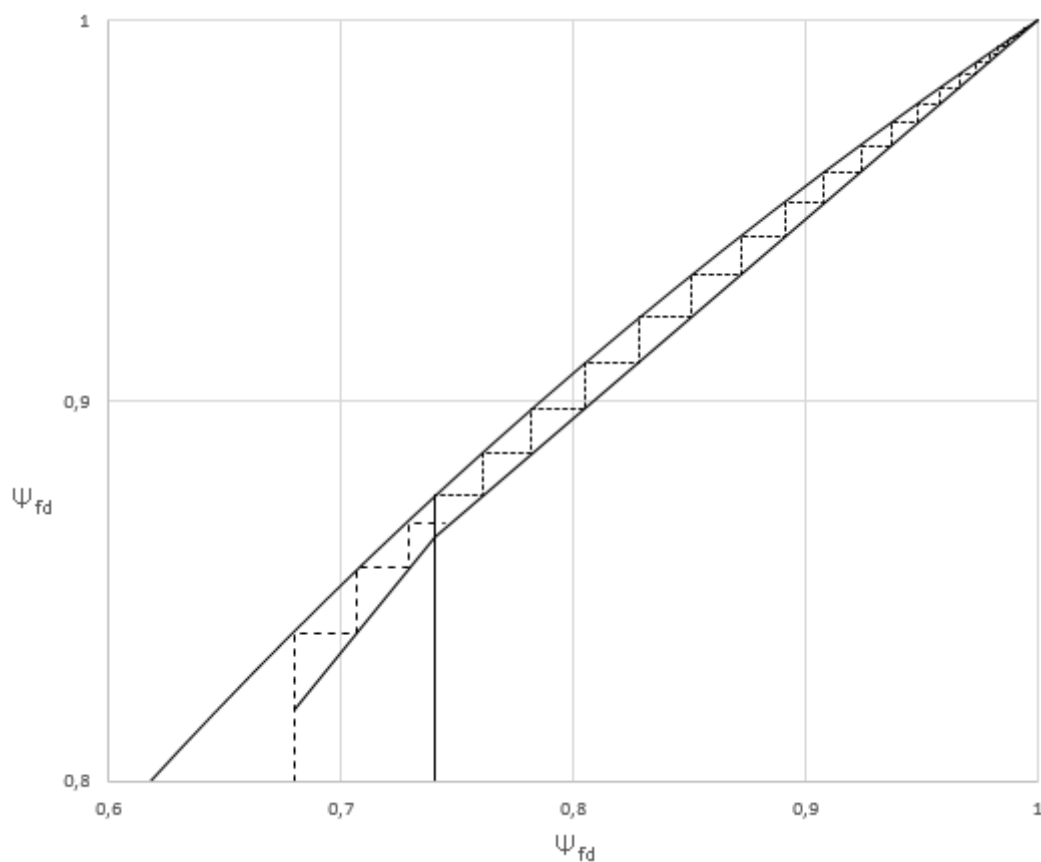
Za minimalni refluks u koloni uzima se najveći dobiveni i uspoređuje sa stvarnim refluksom.

$$R_1 = 1,1054 \quad (75)$$

$$R_{\min} = 0,9259 \quad (88)$$

Vidi se da je stvarni refluks veći 19 % od minimalnog.

Na slici 21. prikazan je postupak određivanja teorijskog broja plitica.



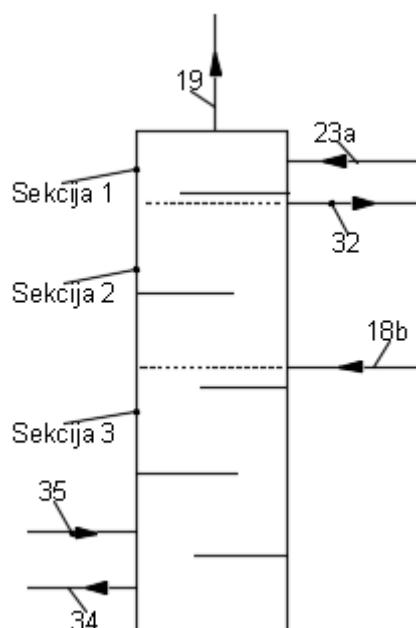
**Slika 21.** Postupak određivanja broja plitica

- Sekcija 1: 3 plitice
- Sekcija 2: 27 plitica

Teorijski broj plitica u koloni je 30.

#### 4.2.1.2. Niskotlačna kolona

Postupak je isti kao za visokotlačnu kolonu, a razlika je što u niskotlačnoj koloni pored napajanja postoji i bočni izlaz. Protok bočnog izlaza biti će uvrštavan u formule s predznakom minus. Na slici 22. shematski je prikazana niskotlačna kolona podijeljena u 3 sekcije.



**Slika 22.** Podjela niskotlačne kolone u sekcije

Protok destilata je:

$$q_{mD} = q_{m19} - q_{m23a} = 1080 - 489 = 591 \text{ kg/h} \quad (89)$$

Refluks u koloni:

$$R_2 = \frac{q_{m23a}}{q_{m19} - q_{m23a}} = \frac{489}{1080 - 489} = 0,8274 \quad (90)$$

U tablici 24. nalaze se podaci točaka potrebnih za proračun minimalnog refluksa.



**Tablica 24.** Podaci za izračun minimalnog refluksa

Točka	$q_m$ (kg/h)	$M$ (kg/kmol)	$q_n$ (kmol/h)	$\Psi$ (kmol/kmol)
D	591	28,0,16	21,1	1
32(B)	221	28,189	7,8	0,96
18b(F)	1106	29,101	38	0,74

Toplinsko stanje napajanja i bočnog izlaza računa se iz jednadžbe. U tablici 25. nalaze se podaci potrebni za izračun toplinskih stanja struje 18b i 32.

**Tablica 25.** Podaci za izračun toplinskih stanja

Točka	$h'$ (kJ/kg)	$h''$ (kJ/kg)	$h_M$ (kJ/kg)	$q_k$
32(B)	-115,8	79,9	80,6	-0,004
18b(F)	-120,5	81	-87,9	0,838

Nagib pravca bočnog produkta je:

$$\operatorname{tg}(\alpha_B) = \frac{q_B}{q_B - 1} = \frac{-0,004}{-0,004 - 1} = 0,004 \quad (91)$$

$$\alpha_B = 0^\circ \quad (92)$$

Nagib pravca napajanja je:

$$\operatorname{tg}(\alpha_F) = \frac{q_F}{q_F - 1} = \frac{0,838}{0,838 - 1} = -5,17 \quad (93)$$

$$\alpha_F = -79^\circ \quad (94)$$

Presjecišta radnih linija s dijagonalom McCabe-Thieleovog dijagrama:

Sekcija 1:

$$\Psi_{fd,1} = \frac{-q_{nD} \Psi_D}{-q_{nD}} = \frac{-21,1 \cdot 1}{-21,1} = 1 \text{ kmol/kmol} \quad (95)$$

Sekcija 2:

$$\Psi_{fd,2} = \frac{-q_{nB} \Psi_B - q_{nD} \Psi_D}{-q_{nB} - q_{nD}} = \frac{-7,8 \cdot 0,96 - 21,1 \cdot 1}{-7,8 - 21,1} = 0,99 \text{ kmol/kmol} \quad (96)$$

Sekcija 3:

$$\Psi_{fd,3} = \frac{-q_{nB} \Psi_B + q_{nF} \Psi_F - q_{nD} \Psi_D}{-q_{nB} + q_{nF} - q_{nD}} = \frac{-7,8 \cdot 0,96 + 38 \cdot 0,74 - 21,1}{-7,8 + 38 - 21,1} = -0,05 \text{ kmol/kmol} \quad (97)$$

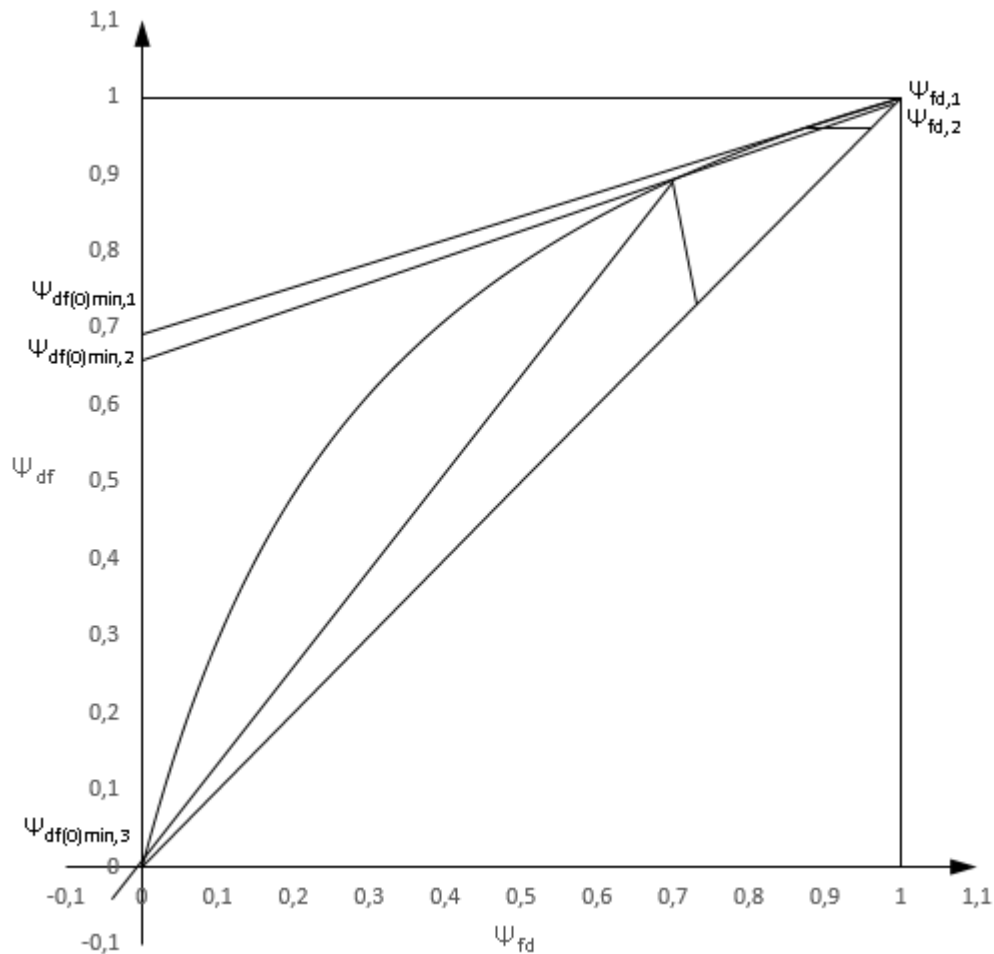
Kao i u prethodnom primjeru odrede se odsječci na ordinati:

$$\Psi_{df(0)min,1} = 0,692 \text{ kmol/kmol} \quad (98)$$

$$\Psi_{df(0)min,2} = 0,652 \text{ kmol/kmol} \quad (99)$$

$$\Psi_{df(0)min,3} = 0,013 \text{ kmol/kmol} \quad (100)$$

Pravci radnih linija prikazani su na slici 23.



**Slika 23.** Pravci radnih linija niskotlačne kolone

Minimalni refleks u sekciji 1:

$$R_{min,1} = \frac{\Psi_D}{\Psi_{df(0)min,1}} - 1 = \frac{1}{0,69} - 1 = 0,4492 \quad (101)$$

Minimalni refleks u sekciji 2:

$$R_{min,2} = \frac{\Psi_D - \frac{-q_{nB}}{q_{nD}} \Psi_B}{\Psi_{df(0)min,2}} - \frac{-q_{nB}}{q_{nD}} (Q_B - 1) - 1 \quad (102)$$

$$= \frac{1 - \frac{-7,8}{21,1} 0,96}{0,65} - \frac{-7,8}{21,1} (-0,004 - 1) - 1$$

$$R_{\min,2} = 0,7068 \quad (103)$$

Minimalni refluks u sekciji 3:

$$R_{\min,3} = \frac{\psi_D - \left( \frac{-q_{nB}}{q_{nD}} \psi_B + \frac{q_{nF}}{q_{nD}} \psi_F \right)}{\psi_{df(0)\min,3}} - \left[ \frac{-q_{nB}}{q_{nD}} (Q_B - 1) + \frac{q_{nF}}{q_{nD}} (Q_F - 1) \right] - 1 \quad (104)$$

$$= \frac{1 - \left( \frac{-7,8}{21,1} 0,96 + \frac{38}{21,1} 0,74 \right)}{0,013} - \left[ \frac{-7,8}{21,1} (-0,004 - 1) + \frac{38}{21,1} (0,838 - 1) \right] - 1$$

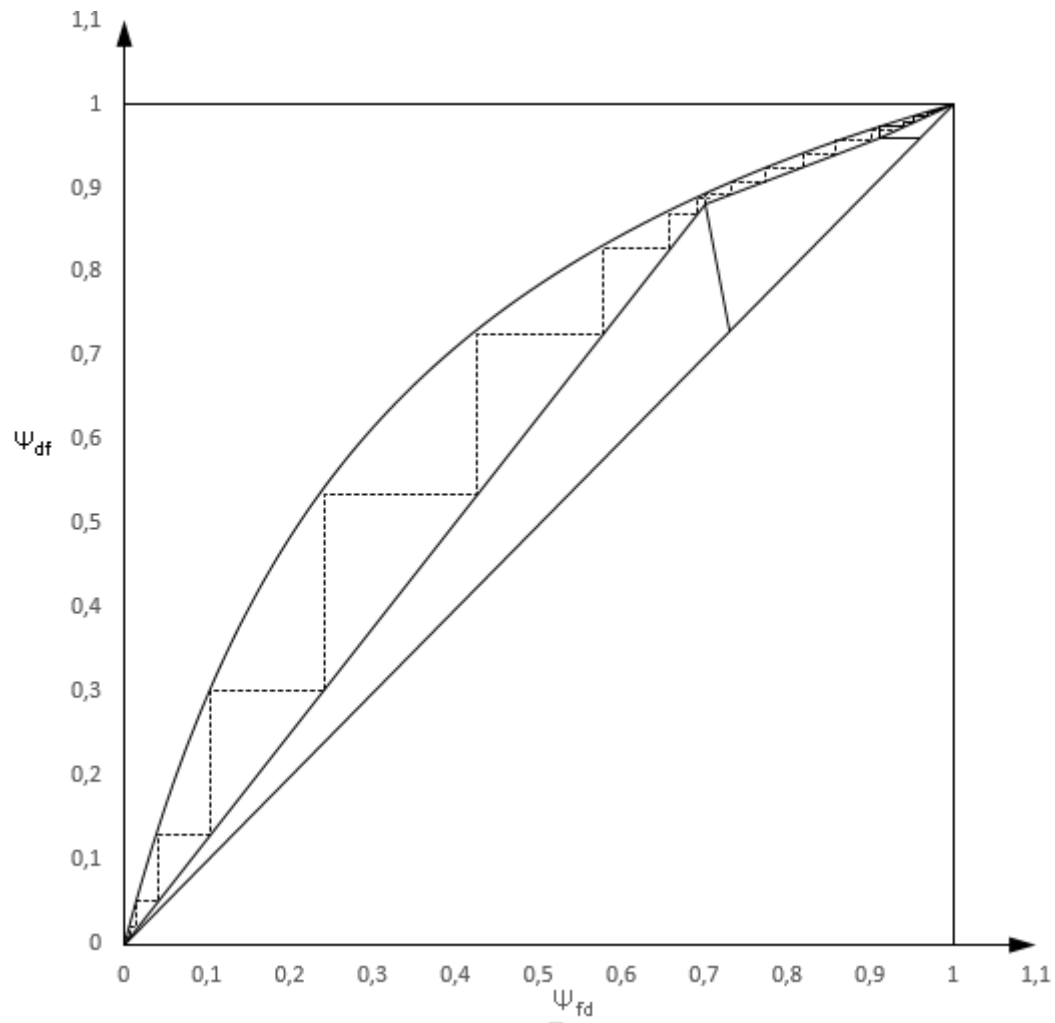
$$R_{\min,3} = 0,619 \quad (105)$$

Za minimalni refluks u koloni uzima se najveći dobiveni i uspoređuje sa stvarnim refluksom.

$$R_2 = 0,8274 \quad (90)$$

$$R_{\min} = 0,7068 \quad (106)$$

Vidi se da je stvarni refluks veći 17 % od minimalnog.



**Slika 24.** Postupak određivanja broja plitica

- Sekcija 1: 15 plitica
- Sekcija 2: 6 plitica
- Sekcija 3: 12 plitica

Teorijski broj plitica u koloni je 33.

## 4.2.2. Ukapljeni kisik (LOX)

### 4.2.2.1. Visokotlačna kolona

Ulazne i izlazne struje iz kolone su jednakog rasporeda kao u prethodnom dijelu te će za određivanje teorijskog broja plitica biti korištene jednake jednadžbe.

Protok destilata je:

$$q_{mD} = q_{m28} - q_{m31} = 857 - 469 = 388 \text{ kg/h} \quad (107)$$

Refluks u koloni:

$$R_1 = \frac{q_{m31}}{q_{m28} - q_{m31}} = \frac{469}{857 - 469} = 1,2087 \quad (108)$$

U tablici 26. nalaze se podaci za destilat i struju napajanja kolone.

**Tablica 26.** Podaci za destilat i struju napajanja

Točka	$q_m$ (kg/h)	$M$ (kg/kmol)	$q_n$ (kmol/h)	$\Psi$ (kmol/kmol)
D	388	28,016	13,8	1
18a(F)	112	29,101	3,9	0,74

U tablici 27. nalaze se podaci za vrelu kapljevinu i suhozasićenu paru struje 18<sub>a</sub>

**Tablica 27.** Podaci za stanje zasićenja struje 18<sub>a</sub>

Točka	$h'$ (kJ/kg)	$h''$ (kJ/kg)	$h_M$ (kJ/kg)
18a	-87,7	89	-88,5

Toplinsko stanje napajanja je:

$$q_1 = \frac{h' - h_M}{h'' - h'} = \frac{89 - (-88,5)}{89 - (-87,7)} = 1,004 \quad (109)$$

Nagib pravca napajanja je:

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{q_1}{q_1 - 1} = \frac{1}{1 - 1} = \frac{1}{0} = +\infty \quad (110)$$

$$\alpha = 90^\circ \quad (111)$$

Presjecišta radnih linija s dijagonalom McCabe-Thieleovog dijagrama iz jednadžbe:

Sekcija 1:

$$\Psi_{fd,1} = 1 \text{ kmol/kmol} \quad (112)$$

Sekcija 2:

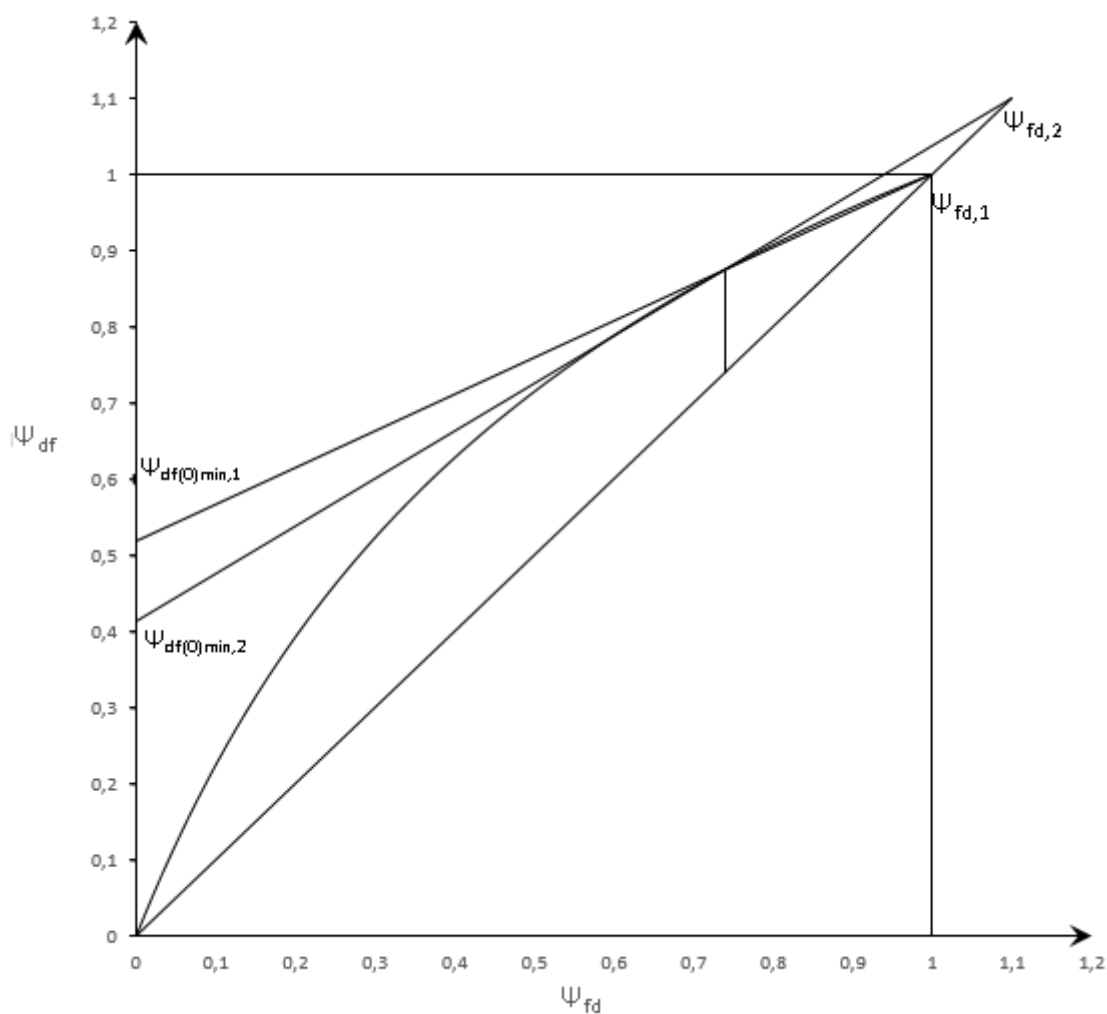
$$\Psi_{fd,2} = 1,1 \text{ kmol/kmol} \quad (113)$$

Odsječci na ordinati su:

$$\Psi_{df(0)\min,1} = 0,52 \text{ kmol/kmol} \quad (114)$$

$$\Psi_{df(0)\min,2} = 0,41 \text{ kmol/kmol} \quad (115)$$

Na slici 25. prikazani su pravci radnih linija.



**Slika 25.** Pravci radnih linija

Minimalni refleks u sekciji 1:

$$R_{\min,1} = 0,9259 \quad (116)$$

Minimalni refleks u sekciji 2:

$$R_{\min,2} = 0,9201 \quad (117)$$

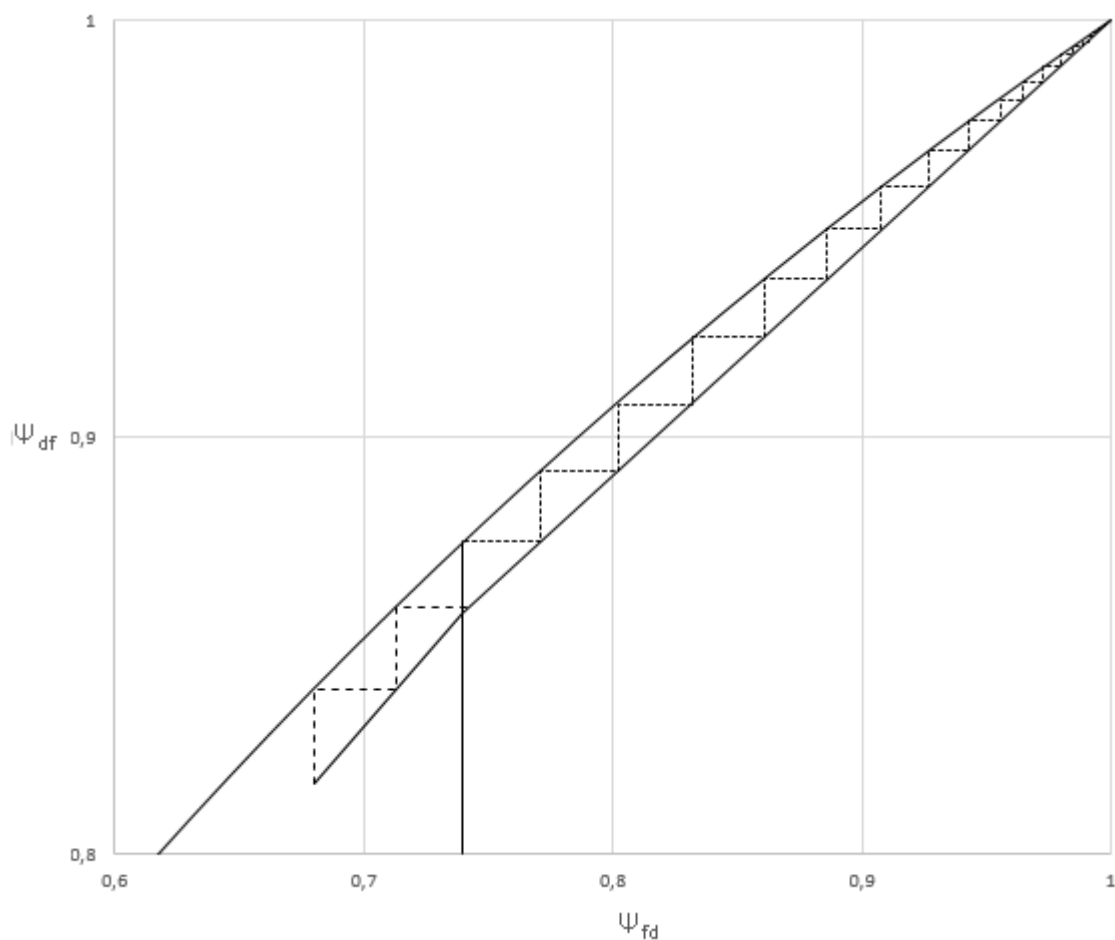
Za minimalni refluks u koloni uzima se najveći dobiveni i uspoređuje sa stvarnim refluksom.

$$R_1 = 1,2087 \quad (108)$$

$$R_{\min} = 0,9259 \quad (118)$$

Vidi se da je stvarni refluks veći 30 % od minimalnog.

Na slici 26. prikazan je postupak određivanja teorijskog broja plitica.



**Slika 26.** Postupak određivanja broja plitica

- Sekcija 1: 2 plitice
- Sekcija 2: 23 plitice

Teorijski broj plitica u koloni je 25.

#### 4.2.2.2. Niskotlačna kolona

Raspored ulaznih i izlaznih struja jednak je rasporedu struja niskotlačne kolone u predhodnom poglavlju. Protok bočnog produkta uvrštava se s predznakom minus

Protok destilata je:

$$q_{mD} = q_{m19} - q_{m23a} = 1029 - 532 = 497 \text{ kg/h} \quad (119)$$

Refluks u koloni:

$$R_2 = \frac{q_{m23a}}{q_{m19} - q_{m23a}} = \frac{532}{1029 - 532} = 1,0704 \quad (120)$$

U tablici 28. nalaze se podaci točaka potrebnih za proračun minimalnog refluksa.

**Tablica 28.** Podaci za izračun minimalnog refluksa

Točka	$q_m$ (kg/h)	$M$ (kg/kmol)	$q_n$ (kmol/h)	$\Psi$ (kmol/kmol)
D	497	28,0,16	17,7	1
32(B)	221	28,189	7,8	0,96
18b(F)	1012	29,101	34,8	0,74

U tablici 29. nalaze se podaci za izračun toplinskih stanja napajanja i bočnog produkta

**Tablica 29.** Podaci za izračun toplinskih stanja

Točka	$h'$ (kJ/kg)	$h''$ (kJ/kg)	$h_M$ (kJ/kg)	$q_k$
32(B)	-115,8	79,9	80,6	-0,004
18b(F)	-120,5	81	-88,5	0,841

Nagib pravca bočnog produkta je:

$$\text{tg}(\alpha_B) = \frac{q_B}{q_B - 1} = \frac{-0,004}{-0,004 - 1} = 0,004 \quad (121)$$

$$\alpha_B = 0^\circ \quad (122)$$

Nagib pravca napajanja je:

$$\text{tg}(\alpha_F) = \frac{q_F}{q_F - 1} = \frac{0,841}{0,841 - 1} = -5,29 \quad (123)$$

$$\alpha_F = -79^\circ \quad (124)$$



Presjecišta radnih linija s dijagonalom McCabe-Thieleovog dijagrama:

Sekcija 1:

$$\Psi_{fd,1} = 1 \text{ kmol/kmol} \quad (125)$$

Sekcija 2:

$$\Psi_{fd,2} = 0,99 \text{ kmol/kmol} \quad (126)$$

Sekcija 3:

$$\Psi_{fd,3} = -0,05 \text{ kmol/kmol} \quad (127)$$

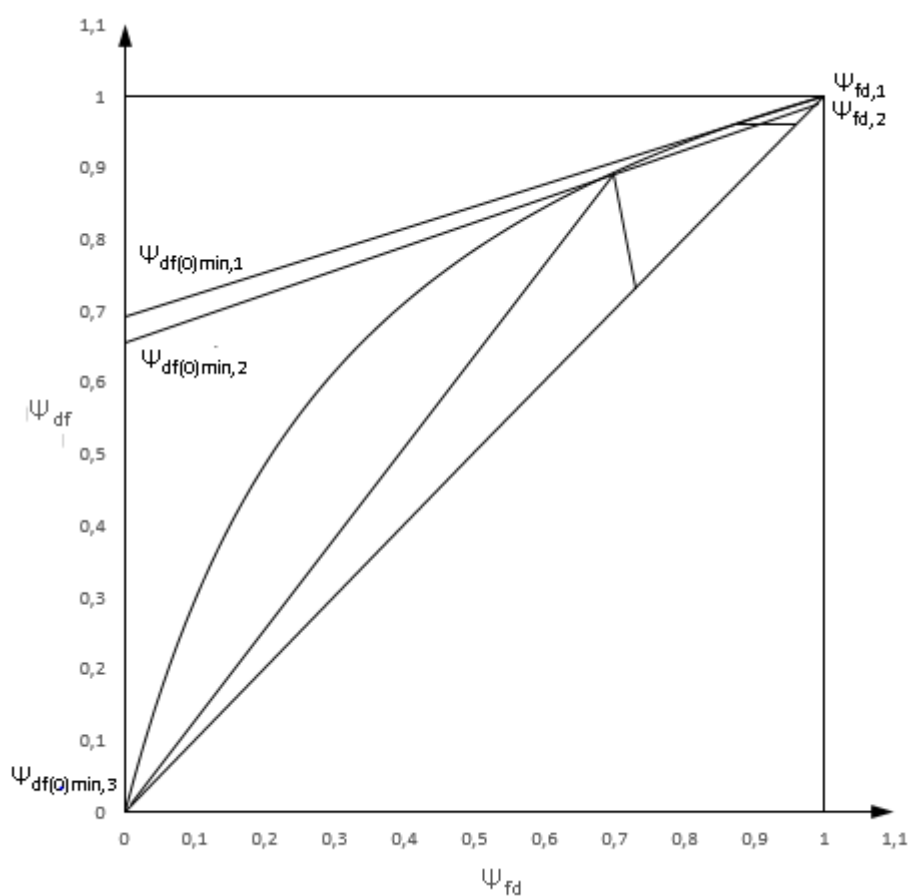
Odsječci na ordinati su:

$$\Psi_{df(0)\min,1} = 0,692 \text{ kmol/kmol} \quad (128)$$

$$\Psi_{df(0)\min,2} = 0,654 \text{ kmol/kmol} \quad (129)$$

$$\Psi_{df(0)\min,3} = -0,016 \text{ kmol/kmol} \quad (130)$$

Pravci radnih linija prikazani su na slici 27.



**Slika 27.** Pravci radnih linija

Minimalni refluks u sekciji 1:

$$R_{\min,1} = 0,4444 \quad (131)$$

Minimalni refluks u sekciji 2:

$$R_{\min,2} = 0,7309 \quad (132)$$

Minimalni refluks u sekciji 3:

$$R_{\min,3} = 0,6299 \quad (133)$$

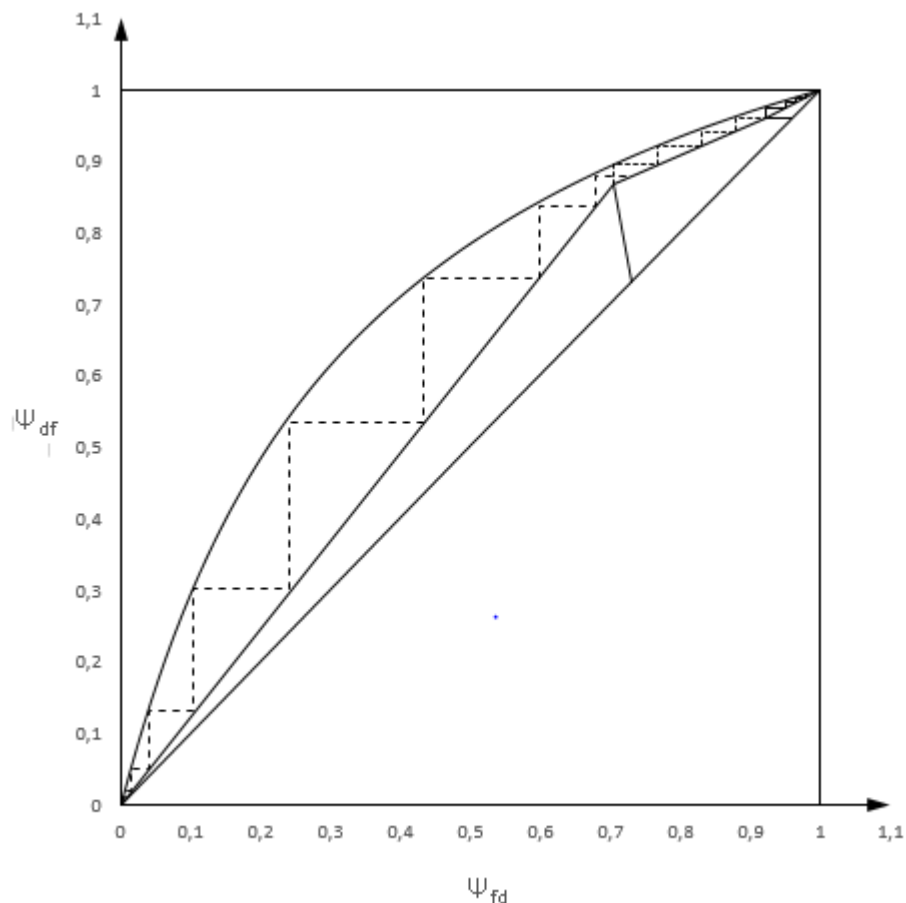
Za minimalni refluks u koloni uzima se najveći dobiveni i uspoređuje sa stvarnim refluksom.

$$R_2 = 1,0704 \quad (120)$$

$$R_{\min,} = 0,7309 \quad (134)$$

Vidi se da je stvarni refluks veći 46 % od minimalnog.

Na slici 28. je prikazan postupak u McCabe-thieleovom dijagramu



**Slika 28.** Određivanje broja plitica

- Sekcija 1: 14 plitica
- Sekcija 2: 4 plitice
- Sekcija 3: 8 plitica

Teorijski broj plitica u koloni je 26.

U tablici 30. prikazana je usporedba minimalnog broja plitica za proračunate režime

**Tablica 30.** Usporedba broja plitica za različite režime rada

Režimi	visokotlačna kolona		niskotlačna kolona	
	broj plitica	$R_{stv}/R_{min} (\%)$	broj plitica	$R_{stv}/R_{min} (\%)$
ukapljeni dušik (LIN)	30	19	33	17
ukapljeni kisik (LOX)	25	30	26	46

Iz tablice 30. vidi se da je u režimu ukapljenog dušika teorijski broj plitica visokotlačne kolone 30, a niskotlačne kolone 33. Teorijski broj plitica visokotlačne kolone u režimu ukapljenog kisika je 25, a niskotlačne kolone je 26. Zaključno se vidi da povećanjem omjera stvarnog i minimalnog refluksa pada teorijski broj plitica u kolonama.

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je prvo postavljena shema postrojenja i sve njene komponente, a nakon toga slijedi opis procesa separacije zraka. Potom je opisana svaka komponenta i prikazane su njene bilance. Prije analize rada bilo je potrebno odrediti niz varijabilnih parametara koji će utjecati na izlazne proizvode. U analizi je također prikazano kako temperature na ulasku u turbine utječu na količine izlaznih proizvoda. Provedenom analizom određene su različite kombinacije tih parametara za svaki režim rada. Nakon toga određen je teorijski broj plitica za svaki režim rada. Iz analize se vidi kako je za povećanje izlaznih količine ukapljenog dušika potrebno povećati protok zraka u recirkulaciji te da turbina T2 koja u kojoj se temperatura spusti snižava skoro do temperature zasićenja ima veliku ulogu na izlazne količine proizvoda. Tu se vidi važnost turbine u procesu separacije zraka jer za razliku od prigušnih ventila kod kojih se trajno gubi energija tlaka turbina daje potrebanu snagu za pogon kompresora. Time je jednim dijelom snižena potrošnja električne energije. Kriogena separacija je osim po niskim temperaturama specifična i po tome što je gotovo sva utrošena energija električna, ali se u ovom radu ne analizira promjena potrošnje električne energije a promjenom količina izlaznih proizvoda. U ovisnosti o režimu rada postrojenje može proizvoditi: 29 % ukapljenog dušika, 67 % ukapljenog kisika te 45 % komprimiranog plinovitog kisika. Ukapljeni dušik i komprimirani plinoviti kisik mogu se istovremeno proizvoditi u danim postotcima. Nakon analize rada određen je teorijski broj plitica prema McCabe-Thieleovom postupku koji je modificiran za složene kolone. Iz dfijagrama za određivanje teorijskog broja plitica vidi se da se plitice ne mogu ucrtavati do čistih komponenti nego se s ucrtavanjem prestaje kad se pređe koncentracija od 99,9 %.

## LITERATURA

- [1] Bošnjaković, F., *Nauka o toplini III*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1986.
- [2] Galović, A., *Termodinamika I*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [3] Beer, E., *Destilacija*, HDKI, Zagreb, 2006.
- [4] Górak, A., Sorensen E., *Distillation: Fundamentals and Principles*, 2014.
- [5] Górak, A., Schoenmakers H., *Distillation: Operation and Applications*, Cambridge: Academic Press, 2014.

# **PRILOG**

## **I. Tehnička dokumentacija**